

Isto Turunen

TURPEEN KERUUKONEIDEN PÖLYÄMISEN HALLINTA VESISUMULLA

Teknis-luonnontieteellinen tiedekunta
Diplomityö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Isto Turunen: Turpeen keruukoneiden pölyämisen hallinta vesisumulla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2019

Turpeen tuotanto on Suomessa tarkkaan säädeltyä ja luvanvaraista toimintaa, joka vaatii ympäristöluvan. Ympäristöluvassa säädetään esimerkiksi rajoituksia pölyämistä aiheuttavalle toiminnalle, jos työmaan läheisyydessä sijaitsee asutusta tai pölyämisestä katsotaan olevan muuta haittaa. Nykyaikaisten turpeenkeruukoneiden pölypäästöt ovat yleisesti pienempiä, kuin vanhojen mallien pölypäästöt. Vapo Oy haluaa vähentää entisestään turvetuotannosta aiheutuvaa pölyämistä ongelmallisiksi koetuilla tuotantoalueilla ja on sen vuoksi kehittänyt veden korkeapainesumutukseen perustuvan pölynhallintajärjestelmän, jolla pystytään vaikuttamaan pölypäästöihin. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kyseisen pölynhallintajärjestelmän testaamiseen mekaanisessa kokoojavaunussa ja sivutaan myös sen toimintaa imukokoojavaunussa.

Pölynhallintajärjestelmän toiminnassa oli kolme avointa kokonaisuutta, joita tässä opinnäytetyössä selvitettiin. Ensinnäkin laitteistoa oli testattu käytännön työssä vähän, joten sen toiminnasta ja käyttövarmuudesta haluttiin lisää tietoa. Toinen haaste oli pumpun korkea vedenkulutus käytön aikana, jonka vuoksi käytännön työ hankaloituisi huomattavasti työvuoron aikaisen toistuvan vesisäiliön täyttämisen vuoksi. Kolmas haaste oli pölynhallinnan tehokkuuden parantaminen ja arviointi. Ennen opinnäytetyön aloittamista järjestelmän tehokkuutta oli arvioitu silmämääräisesti satunnaisissa testeissä. Järjestelmän tehokkuudesta haluttiin kuitenkin myös tarkempaa tietoa, mikä vaati erillistä selvitystä järjestelmälle suunnitelluilla pölymittauksilla.

Suomessa on tehty useita tutkimuksia turpeen keruun aikaisesta pölyämisestä [16, 27, 40, 60, 79]. Tähän mennessä tutkimusten mittausmenetelmät eivät kuitenkaan kaikilta osin sovellu tämän työn aiheen mukaisiin mittauksiin. Tämän vuoksi kehitettiin mittausmenetelmä, jolla pystyttiin arvioimaan tarkemmin pölynhallintajärjestelmän toimivuutta turpeen keruun pölypäästöjen hallinnassa. Vesisumutuksella suoritettavan pölynhallinnan tehokkuus riippuu useista tekijöistä ja esimerkiksi hiilikaivoksissa vesisumutuksella pystytään vähentämään ilmassa leijuvaa pölyä 20%–60% ja keskimäärin vain 30% [35]. Pelkkään vesisumutukseen perustuva pölynhallinta ei siis välttämättä ole aina tehokasta, jolloin sen toimintaan tulee yhdistää myös muita ratkaisuja.

Mekaanisen kokoojavaunun turpeen keruun aikaisia pölypäästöjä mitattiin jahtausmittauksilla, joiden tuloksista arvioitiin pölynhallintajärjestelmän vaikutusta pölyämiseen. Sekä jahtausmittauksien aikana että erillisillä testeillä arvioitiin ja optimoitiin pölynhallintajärjestelmän vedenkulutusta ja pölynsidontatehokkuutta. Testien ja mittauksien aikana seurattiin myös laitteiston toimintaa ja kestävyyttä käytännön työssä. Mittausdatasta tehdyn arvion pohjalta pölynhallintajärjestelmän pölynsidontatehoksi laskettiin $73 \pm 10\%$. Mekaanisen kokoojavaunun keruusäiliön täyttöasteen ja sisäisen paineen yhteisvaikutuksen arvioitiin todennäköisesti lisäävän eniten pölyämistä turpeen keruun aikana. Vedenkulutuksen optimoinnin osalta painepumpun vedenkulutusta todennäköisesti voidaan alentaa tyydyttävälle tasolle, mikäli laitteistoon tehdään pölynhallintaa tehostavia muutoksia. Suurimmaksi haasteeksi pölynhallintajärjestelmän toiminnalle osoittautui tekniikan toimintavarmuus haastavissa työolosuhteissa.

Avainsanat: Mekaaninen kokoojavaunu, imukokoojavaunu, turvepöly, pölyn hallinta, pölymittaus, vesisumu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Isto Turunen: Dust control of peat harvesters with water spray
 Master of Science Thesis
 Tampere University
 Master's Degree Programme in Science and Engineering
 April 2019

Peat production is strictly regulated in Finland, and it requires an environmental permit. The permit stipulates, for example, restrictions for actions that cause dusting, if the area near the worksite is inhabited or the dust is otherwise considered harmful. Modern peat harvesting machines tend to release less dust than older peat harvesters. Vapo Oy aims to decrease the dusting caused by peat production in production areas that are seen as the most problematic ones. Therefore Vapo Oy has developed a dust controlling system based on high pressure water spraying, by which it is possible to affect to the dust emissions. This Master's Thesis focuses on testing that dust controlling system in a mechanical harvester and also on its operating in a pneumatic milled peat harvester, but in less detail.

In this dust controlling system, there were three unities, which this Thesis examined. Firstly, the machinery was tested in practice only a few times, so more knowledge of its functioning and dependability was needed. The second challenge was that in the action the spraying system's pump used a lot of water, and continuously refilling the water tank would complicate the hands-on work during a shift. The third goal of this Thesis was to and evaluate and improve the effectiveness of dust control. Before this Thesis, the system's effectiveness had only been evaluated visually and without using any measuring equipment. Further investigation in dust measurement specifically designed for the system was also needed for more detailed information of its effectiveness. In Finland, there are multiple studies regarding the dusting during peat harvesting [16, 27, 40, 60, 79]. The measuring methods used in these studies do not apply to this Thesis' topic's measurements in every respect. That is why a new measurement method was developed.

By this method it is possible to evaluate the dust control system's effectiveness in controlling the dust emissions caused by peat harvesting in more detail. The effectiveness of dust control by using water spray depends on many variables, and for example in coal mines the dust in the air can be reduced from 20% to 60%, on average only 30% by using water spray [35]. So the effectivity of water spray's dust collection is not very effective in all situations, and that is when other solutions need to be combined with it.

Dust emissions of a mechanical harvester were measured by mobile measuring equipment with position was changed on field continuously based on movements of mechanical harvester. Results were used to evaluate the effects of dust control system to dusting. Both during dust measurements and by using separate tests the water consumption and dust collection efficiency of the dust controlling system were evaluated and optimized. At the same time, also the machinery's functioning and endurance in hands-on action were monitored. The measured data was evaluated, and the dust collection efficiency of the dust controlling system was calculated to be $73 \pm 10\%$. It was determined that mechanical harvester's collection tank's filling and internal pressure's combined effect is likely major cause to increase of dusting during harvesting. Regarding optimizing the water consumption, the pump's water consumption can probably be lowered to a satisfactory level, if the dust control effectiveness of the machinery is enhanced. The most major difficulty for the dust controlling system and its functioning was the reliability of the technology in a very challenging work environment.

Keywords: Mechanical harvester, pneumatic peat harvester, peat dust, dust control, dust measurement, water spray

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Vapo Oy:n työmailla ja toimitiloissa yhteistyössä Vapon, työmaiden yrittäjien, Ramboll Oy:n ilmanlaatu-yksikön ja Tampereen yliopiston diplomityöni ohjaajan kanssa. Työn mittaukset, järjestelyt ja laitteistot rahoitti Vapo.

Työn suunnittelu alkoi vuoden 2017 lopun tienoilla, jota ennen Vapon kanssa oli sovittu aihe ja sen rajaus. Aiheen ollessa monialainen sen rajaus muuttui hieman työskentelyn edetessä, mutta itse tavoitteet vesisumutuksen testaamisesta ja pölytutkimuksesta pysyivät samana. Työn suurin haaste oli kehittää monitavoitteiset mittaukset ja testit ympäristöön, johon liittyi paljon epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi tässä työssä käytettyjen mittaustekniikoiden toimivuudesta vesisumutukselle altistetuissa turvepölymittauksissa turpeen keruun aikana ei ollut aiempaa suoraan sovellettavaa tutkimustietoa. Mittaukset olivat myöskin osittain sääriippuvaisia, koska esimerkiksi sade esti pölymittaukset ja voimakas muuttuva tuuli hankaloitti niitä. Mittausten suunnittelussa ja järjestämisessä korvaamaton apu tulikin yhteistyötahojen kautta.

Kiitos kaikille mukana olleille Vapolaisille, yrittäjille ja työntekijöille käytännön järjestelyihin ja turvetuotantoon liittyviin asioihin saamastani opastuksesta ja apukäsistä. Kiitän Vapolta työtäni ohjannutta Ari Erkkilää sekä kehitystyössä mukana olleita Janne Alppia ja Jukka Viitasta arvokkaasta panoksestanne. Lisäksi kiitän Sompanevan yrittäjää Jaakko Saloa erityisesti kalustoon tehtyjen muutosten ja korjausten osalta. Ilman toimivia työkoineita ja pumppuja eivät mittaukset olisi onnistuneet näin hyvin. Pölymittausten suunnittelu ja suorittaminen Vapolaisten, yrittäjien ja Rambollin kanssa sujui mutkattomasti ja tekemisen meaningillä. Kiitos pölymittauksien suorittamisessa mukana olleelle Rambollin Jussi Kärtevälle. Diplomityöni työstämiseen sain näkökulmaa ja tietotaitoa ohjaajaltani professori Jorma Keskiseltä. Kiitos palautteesta, ideoista, avusta ja työni ohjaamisesta.

Kiitos perheelle, ystäville ja Tampereen vahvimmalle opiskelijakerholle diplomityöhöni, auton korjaamiseen, penkkirautojen varmistamiseen ja mihin vain tärkeään elämän osa-alueeseen saamastani tuesta.

Tampereella, 22. huhtikuuta 2019

Isto Turunen

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Turve ja turvepöly	3
2.1	Turpeen muodostuminen ja turvetyypit	4
2.2	Turpeen kemiallinen koostumus ja fysikaaliset ominaisuudet	5
2.3	Kokoojavaunujen emittoiman turvepölyn koostumus ja ominaisuudet	6
2.4	Turvepölyn kulkeutuminen ja haitat	11
2.5	Pölytutkimus turve- ja maatalousalalla	13
2.5.1	Kuopion yliopiston turvepölymittaukset kesällä 1999 Kaikonsuolla	13
2.5.2	Tissari et al. tutkimus jyrshinturvetuotannon pölyämisestä Konnun- suolla 2000	14
2.5.3	Rambollin turvepölymittaukset Lantonsuolla ja Sammalistonsuolla 2016-2018	15
2.5.4	Symo Oy:n kirjallisuusselvitys turvetuotannon pöly- ja melupäästöistä	16
2.5.5	LIDAR:iin ja pistemittauksiin perustuvat pölyämismittaukset maan- viljelyssä	16
3	Pölynhallinta vesisumulla ja pölynhallintajärjestelmän testaus	19
3.1	Vesisumu pölynhallinnassa	19
3.1.1	Vesipisaran koon ja nopeuden sekä veden paineen ja kulutuksen vaikutus pölynsidontatehokkuuteen	21
3.1.2	Tensidien vaikutus vesisumun pölynsidontaan	25
3.1.3	Suuttimen vaikutus vesisumun pölynsidontatehokkuuteen	27
3.2	Vesisumun pisaroiden elinaika ja vaikutus kosteuteen	31
3.2.1	Vesisumutuksen vaikutus ilman kosteuteen	31
3.2.2	Vesipisaran elinaika ilmassa	33
3.3	Vedenkulutusmittauksissa käytetyn pölynhallintajärjestelmän esittely	35
3.3.1	Korkeapainepumppu HPW 200 ja sumutussuuttimet mekaanisessa kokoojavaunussa	35
3.3.2	Veden sumutuksen toteutus mekaanisessa kokoojavaunussa	38
3.3.3	Veden sumutuksen toteutus imukokoojavaunussa	40
3.4	Pölynhallintajärjestelmän vedenkulutusmittaukset	41
3.4.1	Vedenkulutusmittausten tavoitteet	41
3.4.2	Mittausmenetelmät	41
3.4.3	Mittausten suorittaminen ja tulokset	42
3.4.4	Korkeapainepumpun vedenkulutuksen vähentäminen	43
4	Pölymittaukset ja vesisumun vaikutus mittauksiin	47
4.1	Optisten mittalaitteiden edut ja haasteet	47

4.2	Mittauksien epätarkkuustekijät ja niiden minimointi	48
4.3	Vesisumun hallinta mittauslaitteistoilla- ja tekniikoilla	49
4.4	Kesän 2018 turvepölymittaukset	50
4.4.1	Mittausten tavoitteet	51
4.4.2	Mittausmenetelmät ja mittalaitteet pölymittauksissa	51
4.4.3	Mekaaniseen kokoojavaunuun pölymittauksia varten suunnitellut ja toteutetut muutokset	54
4.4.4	Pölymittausten suorittaminen	55
4.4.5	Mittaustulosten käsittely	58
4.4.6	Datojen sovittaminen sekä taustapitoisuuden ja vesisumun huomioiminen mittausten jälkeen	61
4.4.7	Päiväkohtainen pölyäminen ja pölynsidontateho	63
4.4.8	Pölyäminen ja pölynsidontateho täyttöasteittain	66
4.4.9	Tulosten tarkastelu ja luotettavuuden arviointi	69
5	Laitteistojen ja menetelmien arviointi sekä parannusehdotukset	72
5.1	Käytännön havainnot	72
5.2	Mittauslaitteet ja -tekniikat	74
5.3	Parannusehdotukset mekaaniseen kokoojavaunuun ja pölynhallintajärjestelmään	75
5.3.1	Pölyämisen hallinta	75
5.3.2	Painepumpun vesisumutuksen optimointi	76
5.3.3	Veden sumutuksen tekniset haasteet	78
6	Yhteenveto	79
	Lähdeluettelo	82
	Liite A Pölymittausten mittauskohtainen data	88
A.1	Mittauskohtaiset parametrit	88
A.2	Mittausdata	92
	Liite B Ilmatieteenlaitoksen aerosolimittalaitteiden vertailu	95
B.1	Laitevertailun taustaa	95
B.2	Mittaukset ja referenssimittalaite	95
B.3	Datan käsittely ja tulokset	97

KUVALUETTELO

- 2.1 Kuvassa on esitetty esimerkkitapaus suomalaisen suon tavanomaisesta turveprofiilista. Mmpy tarkoittaa korkeutta metreinä merenpinnan yläpuolella. Kuva on saatu Geologian tutkimuskeskuksen raportista [68]. Kuvan käyttöön on saatu lupa Geologian tutkimuskeskukselta. 4
- 3.1 Ilmassa paikoillaan leijuva pisara sitoo pölyhiukkasia ympärillä liikkuvasta ilmasta kahdella eri tavalla. Hiukkanen 1. liikkuu ilman virtaviivan mukaisesti pisaran ohi nopeudella v_p . Hiukkaset 2. ja 3. ovat sitoutuneet pisaraan. Hiukkasen 1. on kooltaan pieni suhteessa pisarakokoon, joten se ei tartu pisaraan, vaan kiertää pisaran. Hiukkanen 2 on kooltaan suurempi, joten se tarttuu vesipisaraan liikkeessaan tarpeeksi läheltä vesipisaraa. Hiukkanen 3. on massaltaan suurin, jolloin se erkanee hitautensa vuoksi virtaviivalta ja törmää pisaraan. 23
- 3.2 Tensidi alentaa veden pintajännitystä. Kuvassa A ja B kohdat kuvaavat pienten noin $2\ \mu\text{m}$ kokoisten hiukkasten sitoutumista vesipisaraan, kun vedellä on normaali pintajännitys. C ja D kohdat kuvaavat tilannetta, jossa veden pintajännitystä on laskettu tensideillä. 27
- 3.3 Vesipisarat työntävät edessä olevaa ilmaa ja sen sisältämiä hiukkasia pois vesisumutuksen läheltä heikentäen vesisumun pölynsidontatehoa ja levittäen pölyä. Kuva on muokattu lähteestä [29]. 29
- 3.4 Pisaroiden ilmastapoistumisaika pisarakoon funktiona. Pisarakoolla tarkoitetaan pisaran alkukokoa. Kuva on piirretty tutkimuksessa [76] julkaistun datan pohjalta. 34
- 3.5 Pölynhallintajärjestelmän suodatin, hydraulikkaventtiili ja painepumppu asennettuna mekaaniseen kokoojavaunuun JMK-55V. Vasemmassa yläkulmassa on suodatin ja alhaalla ovat painepumppu ja venttiili, jota säädetään kuvassa näkyvällä vivulla. Painepumppu on yhdistetty venttiilillä traktorin hydraulikkaan. Hanan sisältävän letkun ja suodattimen kautta vesisäiliöön pumppu taas pumppaa vesisäiliöstä vettä. Pumppu pumppaa veden sumutuselementeille, jotka esitellään alikappaleessa 3.3.2. 36
- 3.6 Vasemmalla H1/4VV-950050 suuttimen teoreettinen veden virtaus eri käyttöpainella sekä oikealla H1/4VV-800050 suuttimen pisarakoko eri käyttöpainella. Näiden kahden suutinmallin pisarakoot ovat todennäköisesti hyvin samanlaiset. Kuva on piirretty lähteen [9] tietojen perusteella. 37
- 3.7 Kuvaan on merkitty numeroilla paikat, joihin suutinelementit voi asentaa. Kuvasta näkyy vain nostohihnan takaa katsottuna oikea puoli. Suuttimet voidaan asentaa toiselle puolelle nostohihnaa samoin. 39

- 3.8 Vedenkulutusmittausten tulokset. Mittaustulokset on esitetty 1:1-suoran avulla. Mitä lähempänä mittauspiste sijaitsee suoraa, sitä tarkemmin se vastaa laskennallista arvoa. Siniset ja punaiset mittauspisteet kuvaavat varikkomittausten dataa ja vihreät pisteet käytännön pölymittauksista arvioitua dataa. Loput kaksi mittauksista epäonnistuivat. 43
- 3.9 Kuvassa esitetään korkeapainepumpun sumutusaika, kun käytettävissä olevan veden tilavuus oli 488 litraa. Paine tarkoittaa korkeapainepumpun sumutukselle asettamaa käyttöpainetta ja sumutusaika aikaa, joka pystytään yhtäjaksoisesti sumuttamaan, ennen kuin vesi loppuu säiliöstä. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä 2.3.2019 sumutuslaitteistossa oli asennettuna 14 kappaletta H1/4VV-950050-suuttimia ja neljä kappaletta H1/4VV-6502-suuttimia. Mikäli vedenkulutusta vähennetään, sumutusaika nousisi merkittävästi, kuten kuvaajasta nähdään. 46
- 4.1 SICK FW101-mittalaite ja sen toimintaperiaate. Mittalaite mittaa optisesti pölyhiukkasten aiheuttamaa sirontaa. Detektorin havaitsema sironta aiheuttaa sähkövirtasignaalin, jonka vastaanotinyksikkö tulkitsee ja lähettää käyttäjälle. Kuva on piirretty SICK:n käyttöohjekirjasta [52] löytyvää kuvaa mukaillen. 52
- 4.2 Mittausten käytännön toteutus. Kuvaan on merkitty eri laitteiden paikat suhteessa toisiinsa mittauksissa. Ainoastaan mittauslaitteen ja lähteen paikat muuttuivat merkittävästi suhteessa toisiinsa eri mittauksissa ja mittauksien aikana, koska mittauslaitteen paikkaa muutettiin tuulen nopeuden mukaan. 54
- 4.3 Kuvassa esitetään opinnäytetyön pölymittausten mittauspaikat. M on lyhenne mittauksesta, esimerkiksi M1 tarkoittaa mittausta 1. Mittausta vastaava sara on merkitty vihreällä viivalla, paitsi M12 on merkitty violetilla viivalla, koska sen mittausreitti kulki poikittain muiden reittien suuntaan nähdessä aivan niiden aloituskohtien lähellä. 57

- 4.4 Vasemman puoleisessa kuvaajassa esitetään sovite, joka on piirretty käyttäen taulukoiden A.2 ja A.4 dataa mittausten osalta, joiden aikana vesisumu oli pois käytöstä. Vastaavasti oikean puoleisessa kuvaajassa esitetään sovite, joka on piirretty käyttäen samoja taulukoita datan osalta, jota mitatessa vesisumu oli käytössä. Sovitteet on laskettu ja piirretty taustapitoisuuden datalle, jossa taustapitoisuus on huomioitu (rasti). Kuvaajiin on piirretty myös alkuperäinen mittausdata (piste). Yksittäisen datapisteen massapitoisuus vastaa tietyn mittauksen aikana suodattimella kerätyistä turvepölystä laskettua massapitoisuutta ja datapisteen sähkövirtasignaali vastaa saman mittauksen aikana mitattua keskimääräistä sähkövirtasignaalia. Alkuperäiseen dataan, jossa taustapitoisuutta ei huomioitu, lisättiin myös SICK-hiukkaslaskuriin asetettu nollavirtasignaali 4 mA ja sitä vastaavaksi massapitoisuudeksi 0 mg/m^3 . Taustapitoisuuden huomioivaan dataan lisättiin taustapitoisuuden keskiarvoistettu sähkövirtasignaali ja sitä vastaavaksi massapitoisuudeksi 0 mg/m^3 . Sovitteen varmuusrajat rajaavat sovitteen varmuusvälin 70 %:n todennäköisyydellä. 62
- 4.5 Kuvassa on esitetty kaikesta validista mittausdatasta laskettu pölyäminen ja pölynsidontateho. Datan validoinnista tarkemmin kerrotaan tässä alikappaleessa sekä alikappaleessa 4.4.5. Merkintä n tarkoittaa tuloksen laskennassa käytettyjen datapisteiden määrää. 64
- 4.6 Kuvassa on esitetty pölyäminen ja pölynsidontateho on-off mittauksissa. Datan valikoitumisesta tarkemmin kerrotaan tässä alikappaleessa sekä alikappaleessa 4.4.5. Pölyämisen virherajat on laskettu kuvan 4.4 sovitteen avulla ja pölynsidontatehon kuvaajan virherajat on laskettu käyttäen pölyämisen virherajoja. Kaikkiin palkkeihin ei laskettu virherajoja ollenkaan, koska massapitoisuuksien keskiarvot ylittivät sovitteen laskentarajat. Merkintä n tarkoittaa tuloksen laskennassa käytettyjen datapisteiden määrää. 65
- 4.7 Mekaanisen kokoojavaunun pölyäminen turpeen keruun aikana täyttöasteen funktiona sekä vesisumun ollessa pois käytöstä että vesisumun ollessa käytössä. Kunkin täyttöastepylvään alaosaan kirjattu " n " tarkoittaa mitattujen mittauspisteiden lukumäärää kyseisellä täyttöasteella. Mittauspiste tarkoittaa SICK-hiukkasmittarilla viiden sekunnin aikana mitattua keskiarvoistettua sirontadatapistettä. Kunkin täyttöastevälin sisältämän datan täyttöasteiden laskennallinen keskiarvo ei ole yhtä suuri, kuin täyttöastevälin geometrinen keskikohta, mutta suurimmassa osassa datajoukkojen keskiarvot ovat hyvin lähellä geometrinen keskikohtaa. Laskennalliset keskiarvot on kuvattu mustalla kolmiolla. Virherajat laskettiin kuvasta 4.4 löytyvien sovitteiden virherajoja käyttäen. Kaikkiin palkkeihin ei laskettu virherajoja, koska massapitoisuuksien keskiarvot ylittivät sovitteen laskentarajan. 67

4.8	Mekaanisen kokoojavaunuun asennetun korkeapainepumpun vesisumutuksen pölynsidontateho vaunun keruusäiliön täyttöasteen funktiona. Virherajat laskettiin kuvan 4.7 virherajoja käyttäen.	68
5.1	Suutinelementin vedensumutus ympäröivään ilmaan. Elementistä lähtevät yksittäiset vesisumut risteävät muutaman metrin päässä sumutussuuttimista ja muodostavat yhtenäisen vesisumupilven	77
A.1	Ensimmäisenä mittauspäivänä 20.8.2018 mitattu data. Koska ensimmäisen päivän mittausdataa ei käytetty tulosten laskennassa, mitattu data on merkitty mustalla katkoviivalla. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkösignaaliipikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M1 tarkoittaa mittausta 1.	92
A.2	Toisena mittauspäivänä 21.8.2018 mitattu data. Mustalla katkoviivalla merkittyä mitattua dataa ei ole otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Punaisella merkitty data tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli pois käytöstä ja sinisellä merkitty data vastaavasti tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli käytössä. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkövirtapiikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M4 tarkoittaa mittausta 4.	93
A.3	Kolmantena mittauspäivänä 22.8.2018 mitattu data. Mustalla viivalla merkittyä mitattua dataa ei ole otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Punaisella merkitty data tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli pois käytöstä ja sinisellä merkitty data vastaavasti tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli käytössä. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkövirtapiikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M13 tarkoittaa mittausta 13.	94

TAULUKKOLUETTELO

2.1	Valtioneuvoston ilmassa leijuville hiukkasille asettamat pitoisuusrajat 10.2.2017 alkaen [63].	3
2.2	Maatuneisuuden vaikutus turpeen sisältämiin kemiallisten yhdisteiden massaosuuksiin.	6
2.3	Taulukossa on esitetty turpeen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Pinta, väli ja pohja tarkoittavat turvekerroksen pintaosaa, väliosaa ja pohjaosaa. Taulukko on tehty lähteen [68] pohjalta.	6
2.4	Eri tutkimuksissa havaittuja pölypäästöjä mekaaniselle kokoojavaunulle ja imukokoojavaunulle. Tutkimuksen [27] suurimman leikkausrajan hiukkaskoko D_p ei ollut varsinaisesti leikkausraja vaan raja, jota suurempia hiukkasia ei analysoitu. Tutkimuksessa [27] JIK-35 imukokoojavaunu on varustettu pölynerottimella, jonka vuoksi sen pölypäästöt jäivät pieniksi verrattuna JIK-30 malliin.	8
2.5	Eri työvaiheiden päästökertoimia eri hiukkaskokoluokille. Lihavoidut arvot ovat mitattuja arvoja ja normaalilla fontilla taulukoidut arvot ovat mitattujen arvojen avulla laskettuja arvoja. Taulukko on tehty lähteen [40] avulla. . . .	11
3.1	Vesisumutuksen keskeisiä ominaisuuksia ja niiden vaikutukset pölynsidontaan.	20
3.2	Kahden eri paineisen vesisumun kuivan pölyn lukumääräpitoisuuden sidontatehokkuus. "Molemmat menetelmät samanaikaisesti" tarkoittaa, että sumutuksessa käytettiin sekä korkea- että matalapainesumua yhtä aikaa [25].	25
3.3	Tutkimuksessa [47] käytetyt suuttimet ja tutkitut parametrit. Viimeisen sarakkeen etäisyyslukemat tarkoittavat sumutussuuttimen etäisyyttä kohtisuorasta tasosta, johon vesisumu sumutettiin	28
3.4	Yleisiä vesisumusuuttimia ja niiden käyttökohteita kaivosteollisuudessa lähteestä [54].	30
3.5	Turpeen-keruun aikaiseen vesisumutukseen vaadittava vesitilavuus sumutusaikaa ja kerättyä pinta-alaa kohden. Lisäksi taulukkoon on laskettu vaaditut vesisäiliön täyttökerrat työvuoron aikana nykyisellä vedenkulutuksella sekä sitä 25% ja 50%:a pienemmällä vedenkulutuksella. Vesisäiliön tilavuus on 488 litraa.	45
4.1	Mittauspisteiden määrät, joissa mittauksen aikana tuulen nopeus oli 6 m/s tai enemmän sekä mittauspisteiden määrät, joissa mittauksen aikana tuuli puhalsi keruuvaunun etusektoriin	71

- A.1 Päivän 20.8.2018 mittausten keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa. 88
- A.2 Päivän 21.8.2018 mittausten 4–6 keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa. 89
- A.3 Päivän 21.8.2018 mittausten 7–12 keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa. 90
- A.4 Päivän 22.8.2018 mittausten keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa. 91
- B.1 Taulukkoon on kerätty aerosolimittalaitteiden tiedot ilmatieteenlaitoksen tekemästä ulkoilmamittauksesta [70]. 96
- B.2 Taulukkoon on kerätty ilmatieteenlaitoksen tekemästä ulkoilmamittauksesta [70] mittalaitteiden suorituskyky sekä PM10 että PM2.5 hiukkasille. Sarakkeessa "Datan keruutehokkuus" on kaksi lukuarvoa kummassakin hiukkaskokoluokassa, koska mittalaitteita oli kaksi. 98

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

ELPI	Sähköinen alipaineimpaktori (engl. Electrical Low Pressure Impactor)
LIDAR	Optinen tutka (engl. Light Detection and Ranging)
M	Mittaus
Mmpy	Metriä merenpinnan yläpuolella
MOUDI	Mikroaukkoimpaktori (engl. Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor)
PM10	Ilmassa leijuvat pienhiukkaset, joiden läpimitta on alle 10 mikrometriä
PM2.5	Ilmassa leijuvat pienhiukkaset, joiden läpimitta on alle 2,5 mikrometriä
SHARP	Synkronoitu reaaliaikainen partikkelimonitori (engl. Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate monitor)
TEOM	Kartioelementin oskilloiva mikrobalaanssimittari (engl. Tapered Element Oscillating Microbalance)
TSP	Kaikki ilmassa leijuvat pienhiukkaset kokoluokasta riippumatta

Merkinnät

AH	Absoluuttinen kosteus (kg/m^3)
\bar{C}	Pölypilven keskimääräinen massapitoisuus (g/m^3)
C_c	Cunninghamin korjauskerroin
CO_2	Hiilidioksidi
D_p	Hiukkasen halkaisija (μm)
D_s	Vesipisaran halkaisija (μm)
E	Emissiokerroin (g/s)
E_C	Keräystehokkuus

η	dynaaminen viskositeetti (Pa·s)
f	Törmäystaajuus (1/s)
f_p	Pölynsidontateho (%)
H_{1-10}	Turpeen maatuneisuusaste
m_v	Vesihöyryn massa (kg)
N	Virtauseksponentti
n	Lukumäärä
n_a	Ilmassa leijuvien hiukkasten lukumääräpitoisuus ($\#/m^3$)
NH_3	Ammoniakki
NH_4^+	Ammoniumioni
P	Pumpun käyttöpaine (bar)
pH	Happamuus
π	Pii
p_∞	Ympäristön höyrynpaine (kPa)
p_s	Saturaatiohöyrynpaine (kPa)
Q	Tilavuusvirta (m^3/s)
RH	Suhteellinen kosteus (%)
ρ_{off}	Pölyn massapitoisuus vesisumutuksen ollessa pois käytöstä (mg/m^3)
ρ_{on}	Pölyn massapitoisuus vesisumutuksen ollessa käytössä (mg/m^3)
ρ_p	Hiukkasen tiheys (kg/m^3)
ρ_v	Veden tiheys (kg/m^3)
R_v	Vesihöyrylle ominainen kaasuvakio ($J/kg \cdot K$)
S_R	Saturaatiosuhde
Stk	Stokesin luku
T	Lämpötila (K)
t	Aika (s)
V	Tilavuus (m^3)
v_p	Hiukkasen nopeus (m/s)
v_s	Vesipisaran nopeus (m/s)
v_{tk}	Traktorin nopeus (m/s)

X_0	Pölypilven leveys (m)
Y_0	Pölypilven pituus (m)
Z_0	Pölypilven korkeus (m)

1 JOHDANTO

Suomalaisessa turvetuotannossa on pölyhaittojen minimoimiseksi kehitetty erilaisia tekniikoita ja menetelmiä, joilla pölyämisen aiheuttamia haittavaikutuksia pyritään vähentämään. Turpeen keruu on tuotannon työvaihe, jossa pölypäästöjä muodostuu erityisesti hakumenetelmää käytettäessä [60]. Muun muassa tämän vuoksi hakumenetelmän käyttö on vähentynyt ja nykyään turpeen keruuseen käytetään yhä useammin mekaanista kokoojavaunua ja imuvaunua. Uusien imuvaunujen pölypäästöt ovat vähentyneet huomattavasti vanhoihin malleihin verrattuna, niissä käyttöön otettujen pölynerotusmenetelmien, kuten syklonien vuoksi [79]. Mekaaniselle kokoojavaunulle pölyämistä vähentäviä tekniikoita ei ole yleisesti käytössä. Vapo Oy:n tietyillä työmailla tällaisille tekniikoille on havaittu olevan tarvetta, minkä vuoksi yrityksessä on kehitetty korkeapainevesipumpun veden sumutukseen perustuva pölynhallintajärjestelmä, jolla pystytään vaikuttamaan pölyämiseen sekä mekaanisen kokoojavaunun että imukokoojavaunun turpeen keruun yhteydessä. Laitteistoa ei kuitenkaan ennen tämän opinnäytetyön aloitusta oltu juurikaan testattu, joten tekniikan toimivuus ja pölyn hallinnan tehokkuus vaativat selvittämistä.

Tähän mennessä suomalainen turvepölytutkimus on keskittynyt suurimmalta osin turvetuotannon kokonaispäästöjen tutkimiseen ja pölyn kulkeutumisen sekä eri työkonien päästökertoimien selvittämiseen, kuten käy ilmi esimerkiksi tämän työn kappaleesta 2.5. Eniten käytetty mittaamenetelmä on ollut, että asetetaan yksi tai useampi kiinteä mittauspiste tiettyyn tai tiettyihin paikkoihin turvenealle tai sen läheisyyteen ja mitataan ilmassa leijuvia pölypitoisuuksia. Suurin haaste tällaisissa mittauksissa on yleensä muuttuvien ympäristötekijöiden, materiaalien ja työtapojen vaikutus mittauksiin ja niiden huomioiminen ja/tai vaikutusten minimoiminen tulosten käsittelyssä. Maatalouden pölypäästöjen mittaamisessa muualla maailmassa on ilmennyt samankaltaisia haasteita. Mittausmekanismilla on pystytty minimoimaan haastavissakin olosuhteissa tehtävien mittausten virheetekijät. Ulkomailla tehdyissä maatalousalan pölymittauksissa on esimerkiksi käytetty liikuteltavia mittaustorneja, laskennallisia malleja ja LIDAR:iin perustuvia mittalaitteita [19, 72].

Tässä opinnäytetyössä kehitettyjen pöly- ja vedenkulutusmittausten tavoitteena oli kerätä tietoa mekaanisen kokoojavaunun turpeenkeruusta aiheutuvasta pölyamisestä, kokoojavaunuun asennetun pölynhallintajärjestelmän toimivuudesta ja tehokkuudesta sekä korkeapainevesipumpun vedenkulutuksesta käytännön työolosuhteissa. Tiedon haluttiin olevan sellaista, että sen avulla voidaan tulevaisuudessa arvioida pölynhallintajärjestelmän käyttömahdollisuuksia ja tehdä laitteistoon parannuksia.

Mittausten suunnittelua ja toteutusta varten tehtiin kirjallisuusselvitys, jossa tutkittiin vesisumutuksen käyttötapoja, toimivuutta ja tehokkuutta pölynhallinnassa. Lisäksi selvitettiin turpeen keruun yhteydessä syntyneiden pölypäästöjen ominaisuuksia, kuten kulkeutumista ympäristöön, pölypilven massapitoisuutta sekä turvepölyhiukkasten kokojakautta.

Luvussa 2 perehdytään kerättävän turpeen muodostumiseen ja ominaisuuksiin sekä turvetuotannossa muodostuvan turvepölyn ominaisuuksiin ja aiheeseen soveltuvaan pölytutkimukseen. Luvussa 3 tutkitaan vesisumutuksella tehtävää pölynhallintaa, vesisumun vaikutusta ympäröivän ilman kosteuteen sekä esitellään Vapo Oy:n mekaanisen kokoojavaunun ja imukokoojavaunun pölynhallintajärjestelmät ja vesisumutukselle tehdyt vedenkulutustestit. Luvussa 4 kartoitetaan optisten mittalaitteiden etuja ja haasteita käytännön mittauksissa sekä kerrotaan kesän 2018 pölymittausten suorittamisesta ja raportoidaan mittaustulokset ja niiden analyysi. Luvussa 5 kerrotaan mittauksista tehdyistä käytännön havainnoista sekä esitetään parannusehdotuksia pölynhallintajärjestelmään, mekaaniseen kokoojavaunuun ja käytettyihin mittaustekniikoihin.

2 TURVE JA TURVEPÖLY

Turvetta kerätään kuivatetuilta suoalueilta, joissa suon turve on muokattu kerättävään muotoon. Turvekentän muokkaamisen työvaiheet ovat yleensä jyrsintä, kääntäminen ja kokoaminen. Muokkaamisen jälkeen turve siirretään aumoihin työvaiheilla keräys ja aumaus. Jokaisessa työvaiheessa työkonoiden toiminta aiheuttaa pölypäästöjä.

Ilmanlaatua kuvaa leijuma, jolla tarkoitetaan ilmassa leijuvan pölyn massaa ilman tilavuusyksikköä kohden. Valtioneuvosto on määrittänyt ilmanlaadun raja-arvot, jotka tulee huomioida myös turvetuotannossa. Valtioneuvoston 10.2.2017 voimaan tulleen ilmanlaatuasetuksen tiedot hiukkasleijuman raja-arvojen osalta on kerätty taulukkoon 2.1. Pölyn laskeumalle valtioneuvosto ei ole määrittänyt raja-arvoja mutta sen viihtyvyyshaittara-jaksi on esimerkiksi VTT:n selvityksessä [33] määritetty $10 \text{ g/m}^2/\text{kk}$.

Tutkimuksen [33] mukaan turvetuotanto aiheuttaa nykyisin harvoin ympäröivillä alueilla ilmanlaadun ohjearvojen tai raja-arvojen ylityksiä. Pölyhaitat ympäristössä ovat lyhytaikaisia viihtyvyys- ja likaantumishaittaa aiheuttavia pitoisuushaittoja. Turvetuotannon lähiesiintymiselle muodostuva terveysriski on marginaalinen. Suurimmat pölypäästöt syntyvät jyrsinturpeen kuormauksessa haku- menetelmällä ja jyrsinturpeen käännessä. [33]

Luvun ensimmäisessä kappaleessa 2.1 esitellään turpeen muodostumista ja erilaisia suomalaisia turvetyyppejä. Kappaleessa 2.2 kerrotaan erilaisten turpeiden kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Kappaleessa 2.3 tutkitaan turpeenkeruukoneiden pölyämistä ja pölypilven hiukkasten ominaisuuksia. Kappaleessa 2.4 tarkastellaan turvepölyn kulkeutumisen haittoja ja terveysvaikutuksia. Viimeisessä kappaleessa 2.5 esitellään referaatteja suomalaisista turvepölytutkimuksista sekä aiheen kannalta soveltuvista maatalouden pölytutkimuksista.

Taulukko 2.1. Valtioneuvoston ilmassa leijuville hiukkasille asettamat pitoisuusrajat 10.2.2017 alkaen [63].

Epäpuhtaus	Raja-arvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Keskiarvon laskenta-aika	Sallittujen ylitysten määrä vuodessa
TSP	120	24 tuntia	7
	50	Vuosi	-
PM10	50	24 tuntia	35
	40	Vuosi	-
PM2.5	25	Vuosi	-

jakaa kolmeen ryhmään niiden ravinnetason perusteella: oligotrofiset (pH alle 4,5), mesotrofiset (pH 4,5-5,5) ja eutroforiset (pH 5,5-7,5). [36] Tutkituista Suomen turvevaroista rahkavaltaisia turpeita on 54 %, saravaltaisia 45% ja ruskosammalvaltaisia turpeita 1 %, joita tavataan pääasiassa Lapissa [68].

Turpeen maatumisastetta kuvaa huminasideetti (H), joka ilmoitetaan kymmenasteikolla niin, että H_1 on maatumatonta turvetta ja H_{10} täysin maatunutta turvetta. Muut maatumisuusasteet saavat arvonsa H_1 :n ja H_{10} :n väliltä. Turpeen rakenne on heterogeeninen ja koostumus vaihtelee vähemmän maatuneista kasvinosista hienojakoiseen amorfiseen massaan. Turpeeksi luokitellaan maalaji, jonka kuivamassa sisältää 75 % tai enemmän orgaanista ainesta. [38]. Maatuneinta turve on Järvi-Suomessa, jossa turpeessa on myös eniten puiden jäännöksiä. Myös Itä-Suomessa turve on pitkälle maatunutta, kun taas matalin maatumisaste on rannikkoseudulla ja Pohjois-Suomessa. Parkanossa, jossa opinnäytetyön mekaanista kokoojavaunua käytetään, turpeen maatumisuus on noin 5,50 – 6,00.[67]

2.2 Turpeen kemiallinen koostumus ja fysikaaliset ominaisuudet

Turve koostuu pääosin suurimolekyylisistä orgaanisista yhdisteistä. Eri yhdisteiden osuus turpeen kuivapainosta kuitenkin muuttuu esimerkiksi turpeen maatumisuusasteen mukaan ja alueittain. Tällöin myös turpeen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet muuttuvat. Taulukosta 2.2 havaitaan, että turve muodostuu suurimolekyylisistä yhdisteistä, kuten selluloosasta, hemiselluloosasta, ligiinistä, proteiineista, hartseista ja humusaineista. Turpeen maatuessa sen hiilipitoisuus kasvaa ja happipitoisuus vähenee. Tällöin selluloosa-, hemiselluloosa- ja ligiinipitoisuus vähenevät ja humushappojen, fulvohappojen ja humiinin pitoisuudet nousevat.[64] Turpeen sisältämät perus-alkuaanit ovat siis hiili, vety, happi, typpi ja rikki. Suomessa turpeiden orgaanisten aineiden pitoisuus on yleensä yli 90 %, josta noin puolet on hiiltä ja loput happea, vetyä ja typpeä. Turve sisältää myös metalleja, kuten rautaa, kalsiumia, alumiinia ja magnesiumia, joiden osuus turpeen kuivapainosta on promillen luokkaa.[68]

Turpeiden kuiva-aineen tuhkapitoisuus on yleensä 1 – 10% valtakunnallisen keskiarvon ollessa 3,4%. Tuhkapitoisuus turpeessa kasvaa suon ravinnetason ja turpeen maatumisuusasteen noustessa. Oheiseen taulukkoon 2.3 on kerätty turpeen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia koko Suomen alueelta. Erikseen on taulukoitu alueet Etelä-Pohjanmaa ja Pirkanmaa, koska Vapo Oy:n pölynhallintajärjestelmää testataan näillä alueilla.

Turpeelle ominaista on positiivisesti varattujen kationien pinta-adsorptio turpeen negatiivisen pintavarauksen vuoksi. Positiivisesti varautuneet kationeita ovat esimerkiksi kasvien ravinteet, raskasmetallit, torjunta-aineet, liuottimet ja proteiinit. Pinta-adsorption lisäksi pinnalla voi tapahtua kompleksoitumista ja ioninvaihtoa. [21] Turvetta käytetään näiden ominaisuuksien vuoksi muun muassa suodattimena, jolloin se sitoo orgaanisia kaasui-

Taulukko 2.2. Maatuneisuuden vaikutus turpeen sisältämiin kemiallisten yhdisteiden massaosuuksiin.

Ainesosa	Vähän maatunut	Keskimaatunut	Maatunut
	H_{1-2}	H_{5-6}	H_{9-10}
	% kuivasta turpeesta	% kuivasta turpeesta	% kuivasta turpeesta
Selluloosa	15 – 20	5 – 15	–
Hemiselluloosat	15 – 30	10 – 25	0 – 2
Ligniini ja sen kaltaiset aineet	5 – 40	5 – 30	5 – 20
Humusaineet	0 – 5	20 – 30	50 – 60
Bitumi (vahat ja hartsit)	1 – 10	5 – 15	5 – 20
Typpipitoiset aineet	3 – 14	5 – 20	5 – 25

ja ilmasta. Esimerkiksi ilmaan haihtuneen NH_3 -molekyylin turve sitoo pinnalleen NH_4^+ -ioniksi. Turpeen adsorptiokyky riippuu sen kasvilajikoostumuksesta siten, että heikosti maatuneilla rahkaturpeilla on saraturpeita parempi adsorptiokapasiteetti suodatettavan liuoksen pH:n ollessa 4 – 5,2 ja vastaavasti heikosti maatuneilla saraturpeilla rahkaturpeita parempi adsorptio liuoksen pH:n ollessa 5,2 – 8. Maatuneisuus vaikuttaa rahkaturpeen adsorptiokapasiteettiin niin, että vähän maatuneet rahkaturpeet sitovat tehokkaammin kuparia kuin pitkälle maatuneet rahkaturpeet. [21]

Kaikille turpeille tyypillistä on, että ne kuivuessaan muuttuvat vettä hylkiviksi [51]. Turvetta voidaan myös käsitellä edelleen, niin että se imee esimerkiksi erittäin hyvin öljyä itseensä. Öljynimeytysturpeella turpeella voidaan esimerkiksi puhdistaa pieni öljyvuoto järvestä, koska vesi ei imeydy turpeeseen mutta öljy imeytyy [28].

Taulukko 2.3. Taulukossa on esitetty turpeen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Pinta, väli ja pohja tarkoittavat turvekerroksen pintaosaa, väliosaa ja pohjaosaa. Taulukko on tehty lähteen [68] pohjalta.

	Koko maa				Etelä-Pohjanmaa			Pirkanmaa		
	Pinta	Väli	Pohja	Keskiarvo	Pinta	Väli	Pohja	Pinta	Väli	Pohja
Kuiva-aine (kg/m^3)	68	80	91	87	70	80	88	66	81	93
pH	3,6	3,8	4,5	4,3	3,4	3,8	4,3	3,7	3,8	4,5
Tuhka-%	2,0	2,5	3,8	3,4	1,8	2,0	2,8	1,4	1,7	3,6
Rikki-%	0,11	0,15	0,23	0,20	0,10	0,11	0,18	0,09	0,13	0,24

2.3 Kokoojavaunujen emittoiman turvepölyn koostumus ja ominaisuudet

Tässä kappaleessa tarkastellaan mekaanisella kokoojavaunulla ja imukokoojavaunulla suoritettua turpeenkeruun aiheuttamaa pölyämistä ja pölyn aerosolihiukkasten kokojakamaa. Kappaleessa pyritään selvittämään, millaiset pölypäästöt ovat välittömästi vaunun läheisyydessä keruun yhteydessä. Tätä tietoa tarvitaan myöhemmin, kun valitaan sopivaa mittalaitetta kyseisten keruuvaunujen pölypäästöjen määrittämiseksi.

Turvepölyn aerosolihiukkaset ovat kemialliselta koostumukseltaan ja rakenteeltaan samanlaisia kuin kentän turve, josta ne ovat irronneet. Turveaerosolin kemiallinen koostumus riippuu paikallisesta kasvillisuudesta ja olosuhteista sekä turpeen maatuneisuudesta. Jyrsinturpeessa veden osuus sen massasta on keruuvaiheessa noin 48 %. Turveaerosolin tiheys riippuu paljon turpeen maatuneisuudesta ja se vaihtelee yleensä välillä 1 g cm^{-3} ja 2 g cm^{-3} [60]. Kentällä olevien potentiaalisten turvepölyhiukkasten koko riippuu turpeen kasvilajikoostumuksesta. Tarkastellaan turvetta, jonka kosteus on 39 %. Tällöin, jos turve on pääasiassa sarapohjaista, noin 38 % hiukkasista on kokoa $D_p < 200 \text{ }\mu\text{m}$. Mikäli turve on pääasiassa rahka- tai tupasvillapohjaista vain noin 8 % on kokoa $D_p < 200 \text{ }\mu\text{m}$ [66]. Keruun aikaisten turvepölypäästöjen hiukkaset ilmassa ovat kuitenkin usein kokoluokaltaan paljon pienempiä kuten tässä kappaleessa myöhemmin esitetään.

Turvepölyä syntyy turvetuotannossa jokaisessa työvaiheessa sääolosuhteiden ollessa suotuisia pölyämiselle. Pölyn leviämiseen vaikuttavista ympäristötekijöistä tärkeimmät ovat tuulennopeus, ilmakan stabiilius ja sekoituskorkeus, ilman kosteus ja sademäärät sekä pölyämispaikan lämpötila ja ilman lämpötilaprofiili. Pölypäästöjen massapitoisuuteen ja hiukkaskokoon vaikuttavat kokoojavaunun pölyn emissiokorkeus, ajonopeus ja täyttöaste sekä turpeen kosteus. Tuulen nostattamaa pölyä saattaa tuulisissa ja kuivissa olosuhteissa vapautua runsaasti ilmaan myös turvekentästä ja -jyrsöksestä . [60]

Imukokoojavaunun pölypäästöistä suomalaisilla turvenevoilla on huomattavasti enemmän mittaustietoa kuin mekaanisesta kokoojavaunusta. Sen vuoksi arvioidaan ensin turvepölyä taulukon 2.4 imukokoojavaunujen tietojen perusteella ja pohditaan sen pohjalta mekaanisen kokoojavaunun pölypäästöjen ominaisuuksia.

Karkeimman eron pölypäästöjen laatuun tuo imuvaunun malli. Taulukosta 2.4 nähdään, että imuvaunumallin JIK-40 pölypäästöt ovat massapitoisuudeltaan paljon pienemmät, kuin JIK-35 pölypäästöt. Poikkeus tästä on Ilmatieteen laitoksen tutkimuksessa Kartasennpää et al Turvetuotannon pölypäästöt ja ympäristö: pölypäästöt ja niiden leviäminen imukokoojavaunutuotannossa [27] käytetty imuvaunu JIK-35, jonka tekniikkaan on lisätty pölynerottimet ja näin ollen pienennetty sen emittoimia päästöjä huomattavasti.

Vanhat imuvaunut aiheuttavat absoluuttisesti enemmän hiukkasia joka kokoluokassa verrattuna uusiin imuvaunuihin ja suhteellisesti eniten hiukkasia on suurissa kokoluokissa suhteessa pieniin hiukkasiin. Tämä havaitaan esimerkiksi taulukosta 2.4 Kuopion yliopiston tekemästä tutkimuksesta Pienhiukkasten aiheuttama pölyhaitta jyrsinturvetuotannossa: imukokoojavaunujen PM2.5- ja kokonaispölypäästöt sekä imukokoojavaunumenetelmän työvaiheiden PM2.5-hajapäästöt [79], jossa JIK-35 imukokoojavaunun keskimääräiset pölypäästöt ovat yli kolmesataakertaiset uuteen JIK-40 imuvaunuun verrattuna.

Samasta taulukosta löytyvät pienet pitoisuudet esimerkiksi tutkimuksissa [24] ja [27] selittyvät mittaustekniikoilla ja laitteilla. Valtion tutkimuskeskuksen 1978 julkaisemassa Tutkimuksessa Pöly turvetuotannossa [24] arvioitiin pölyhiukkasten konsentraatioita, joille työntekijät turvenevoilla altistuvat, eli mittausta ei tehty lähteen välittömästä läheisyydestä. Lisäksi mittaustuloksia oli vain kokoluokasta $D_p < 10 \text{ }\mu\text{m}$ ja mittaustekniikkana käy-

Taulukko 2.4. Eri tutkimuksissa havaittuja pölypäästöjä mekaaniselle kokoojavaunulle ja imukokoojavaunulle. Tutkimuksen [27] suurimman leikkausrajan hiukkaskoko D_p ei ollut varsinaisesti leikkausraja vaan raja, jota suurempia hiukkasia ei analysoitu. Tutkimuksessa [27] JIK-35 imukokoojavaunu on varustettu pölynerottimella, jonka vuoksi sen pölypäästöt jäivät pieniksi verrattuna JIK-30 malliin.

Keruukoneen tyyppi	Malli	Mittauspaikka	Suurin leikkausraja (μm)	Hiukkaskoon keskiarvo (μm)	Massapitoisuus (mg/m^3)	Lähde
Imukokoojavaunu	Ramet HIK-300	Imuvau- nun poistoput- ki	$D_p < 500$	Noin 100	Ei tiedossa	[26]
Imukokoojavaunu	Useita	Työnteki- joiden altistuma	$D_p < 10$	Ei tiedossa	0,0087	[24]
Imukokoojavaunu	JIK-30	Toisioero- tin	$D_p < 564$	72,0	Ei tiedossa	[27]
Imukokoojavaunu	JIK-35	Toisioero- tin	$D_p < 564$	72,0	Ei tiedossa	[27]
Imukokoojavaunu	JIK-35	Poistoka- navan suu	Ei mittausta	Ei mittausta	87400	[79]
Imukokoojavaunu	JIK-40	Poistoput- ken suu	$D_p < 59,8$	Noin 1,3	268	[79]
Imukokoojavaunu	JIK-40	Mallinnus 10 m etäi- syydeltä	$D_p < 2,5$	Ei tiedossa	noin 0,2	[60]
Imukokoojavaunu	JIK-35	Mallinnus 10 m etäi- syydeltä	$D_p < 2,5$	Ei tiedossa	noin 1,6	[60]
Mekaaninen kokoojavaunu	Useita	Työnteki- joiden altistuma	$D_p < 10$	Ei tiedossa	0,0118	[24]

tettiin pölyn keräämistä ja myöhempää analysointia. Näin ollen isojen hiukkasten konsentraatiota ei otettu huomioon. Pölynäytteen analysointi jälkikäteen ei myöskään anna tarkkaa kuvaa mittaushetken jakaumasta ja konsentraatiosta, koska kerätty näyte muuttuu ennen analysointia. Esimerkiksi osa hiukkasista takertuu toisiinsa, kun ne kerääntyvät suodattimeen tai pölypussiin, jolloin hiukkasten keskimääräinen koko on suurempi ja lukumääräkonsentraatio pienempi kuin alkuperäisessä aerosolissa. Hiukkasia saattaa myös leijua näytteestä pois jossain vaiheessa keruun ja analyysin välissä, jolloin varsinkin pieniä hiukkasia poistuu näytteestä.

Tutkimuksessa [27] kerättiin erillisnäytteitä, joilla selvitettiin JIK-30 imukokoojavaunun pölypäästöjen hiukkaskokojakauma. Mitattu hiukkaskokojakauma ei anna tarkkaa kuvaa imuvauunun päästöistä, koska näytteet on otettu sen toisioerottimelle kerääntyneestä pölystä [27]. Kokojakauman määrittäminen tapahtui näytteen keruun jälkeen laboratoriossa Malvern-analysaattorilla, joka lajitteli kaikki $D_p < 564 \mu\text{m}$ hiukkaset [27]. Tällainen arvioin-

timenetelmä ei kuitenkaan ole välttämättä kovin tarkka, eikä tutkimuksessa perusteltu, miten hyvin toisioerottimelta kerätyn hiukkasnäytteen kokojakauma vastaisi ilmassa leijuvien pölypäästöjen kokojakaumaa. Määrittämisessä laskettu keskimääräinen hiukkaskoko oli erittäin suuri: $72 \mu\text{m}$ [27]. Tämä on tyypillistä vanhoille imuvaunuille, kuten myös suuret päästöt, mikä nähdään esimerkiksi taulukon 2.4 tutkimuksessa [79]. Siinä JIK-35 imukokoojavaunun päästöjen massapitoisuudeksi on mitattu keskimäärin $87400 \text{ mg}/\text{m}^3$, joka on paljon verrattuna JIK-40 imuvaunun pölypäästöjen massapitoisuuteen $268 \text{ mg}/\text{m}^3$. Uudella imuvaunulla pölypäästöjen keskimääräinen hiukkaskoko on myös huomattavasti pienempi, vain noin $1 - 2 \mu\text{m}$ [79].

Turpeen maatuneisuus kasvattaa turvepölyn pölyämistä, kuten esimerkiksi tutkimuksissa [26] ja [79] on havaittu. Molemmissa tutkimuksissa päästöjen pölypitoisuus on suunnilleen kolminkertainen maatuneella turpeella verrattuna keskimatuneeseen turpeeseen. Vanhalla imuvaunulla Ramet HIK-300 pölyn keskimääräinen raekoko on hieman suurempi keskimatuneella turpeella kuin maatuneemmalla turpeella [26]. Tämä johtuu luultavasti siitä, että maatuneemman turpeen rakenne on hienompaa, joka korostuu myös sen aiheuttamassa pölyämisessä. Tutkimuksessa [79] uudella JIK-40 imuvaunulla keskimatuneen ja maatuneen turpeen keskimääräiset hiukkaskoot eivät merkittävästi eroa, mutta keskihiukkaskoko on hieman suurempi maatuneella turpeella. Hiukkaskoon moodi on molemmilla maatuneisuusasteilla sama $1,6 < D_p < 4,6 \mu\text{m}$.

Tutkimuksen [79] mittauksissa JIK-40:n PM2.5 massapitoisuuden prosentuaalinen osuus TSP:stä oli $18 - 21\%$. Ottaen huomioon, että pienhiukkasia tarvitaan saman massan saavuttamiseksi suurempi lukumäärä kuin isoja hiukkasia, voidaan sanoa, että uudessa imuvaunussa huomattava osa hiukkaspäästöjen lukumääräpitoisuudesta on PM2.5 pienhiukkasia.

Tuuli kasvattaa turvekentällä PM2.5 massapitoisuutta merkittävästi, kun sen nopeus on noin 4 m/s tai enemmän [8]. Tutkimuksessa [60] esimerkiksi tuulennopeuksilla $4,2 - 6,0 \text{ m/s}$ mitattiin tuulen aiheuttamiksi emissionopeuksiksi $4,7 - 10,4 \mu\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ kun taas tuulennopeuksilla $2,4 - 3,4 \text{ m/s}$ emissionopeudet olivat $0 - 3,2 \mu\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Emissionopeuden yksikkö $\mu\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ tarkoittaa irronneen pölyn massaa neliömetrin pinta-alalta sekunnin aikana. Jyrsinturvekerroksen paksuus vaikuttaa tuulen irrottamaan PM2.5 turvepölyyn, koska pölyä irtaa helpommin jyrsöksen jyrsinturpeesta kuin turvekentästä. Näin ollen tuuli aiheuttaa suurimman PM2.5 pölylisäyksen kovalla tuulella ja paksulla jyrsinturvekerroksella. [60] Tutkimuksessa [79] on tutkittu myös tuulen nostattamaa PM2.5 pölyä. Tarkastellaan seuraavaksi tuulen päivisin aiheuttamaa PM2.5 pölyämistä. Kosteusprosenttiltaan 40% turve aiheuttaa 9 m/s tuulella noin $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2.5 massapitoisuuden lisäyksen ilmaan tuotantoalueen reunalta mitattujen arvojen mukaan. Vastaavat arvot 5 m/s ja 3 m/s tuulella ovat noin $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mikäli turpeen kosteusprosentti on $50 - 60\%$, ovat edellä mainittujen tuulen nopeuksien aiheuttamat turvepölyn massapitoisuudet kertaluokkaa pienemmät, paitsi tuulennopeudella 3 m/s massapitoisuuden arvo on noin $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [79]

Imukokoojavaunun täyttöaste vaikuttaa pölyämiseen: mitä täydempi vaunu on, sitä enem-

män se aiheuttaa pölyämistä. Täyttöaste ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi hiukkaskokojakaumaan. Myöskään turpeen kosteusvaihtelu 38 – 48 % ei merkittävästi vaikuta hiukkaskokojakaumaan. Kuivempi turve kuitenkin pölyää huomattavasti enemmän. [26, 60]

Jaotellaan taulukon 2.5 tietojen avulla imuvaunun JIK-40 päästöjen jakautuminen kokoluokittain. Imuvaunun emittoimasta massapitoisuudesta kokoluokan $D_p < 2,5 \mu m$ hiukkasia on 46 %:a, kokoluokan $2,5 < D_p < 10 \mu m$ hiukkasia on 19 %:a ja kokoluokan $D_p > 10 \mu m$ hiukkasia on 35 %:a. Nämä prosenttiosuudet kuvaavat hieman erilaista päästöjen kokojakaumaa, kuin esimerkiksi taulukossa 2.4 tutkimuksen [79] pölypäästöt, jossa pöly mitattiin suoraan imuvaunun poistoputken suulta. Yhteistä arvioilla on se, että päästöissä kokoluokassa $D_p < 2,5 \mu m$ arvioidaan olevan suhteellisen paljon hiukkasia. Taulukon 2.5 tutkimuksen [40] arviossa erilaista on kuitenkin se, että myös suuren kokoluokan hiukkasia arvioidaan olevan päästöissä huomattavasti. Tutkimuksessa [27] huomattiin, että turvetuotannossa hajapäästöjen osuus on merkittävä ja niiden hiukkaskoko on yleensä suuri. Hajapäästöillä tarkoitetaan päästöjä, joiden päästökohtaa ei voida tarkasti määrittää. Tutkimuksen [79] ja taulukon 2.5 erot kokojakaumien arvioissa saattaa selittää se, että tutkimus [79] ei huomioi imuvaunun hajapäästöjä, kun taas tutkimuksessa [40] ne huomioidaan.

Arvioidaan vielä lopuksi JIK-40 imukokoojavaunun päästöjen ja taulukon 2.5 avulla mekaanisen kokoojavaunun turvepölypäästöjen massapitoisuutta ja pölyn kokojakaumaa. Taulukosta laskettujen mekaanisen kokoojavaunun pölypäästöjen massan kokoluokkien osuudet ovat samat kuin imuvaunulle, koska tutkimuksessa [40] on oletettu, että sekä imukokoojavaunun, että mekaanisen kokoojavaunun pölypäästöjen hiukkaskokojakaumat ovat samat. Taulukosta voidaan laskea mekaanisen kokoojavaunun ja imuvaunun TSP-päästöjen suhde, jossa mekaanisen kokoojavaunun pölypäästöt ovat noin 1,4 kertaa suuremmat kuin imukokoojavaunun. Suhteuttamalla tämä tieto taulukon 2.4 tutkimuksen [79] pölyn massapitoisuuteen, saadaan mekaanisen kokoojavaunun välittömien pölypäästöjen keskimääräiseksi TSP-massapitoisuusemissioiksi noin $375 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Mekaanisen kokoojavaunun pölyn massapitoisuuksien vaihteluväli on tutkimuksessa [24] huomattavasti suurempi kuin imuvaunun ja vaihteluväli painottuu isoihin massapitoisuuksiin. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että mekaanisen kokoojavaunun hihnalla ei ole minkäänlaista pölynerotusta tai vastaavaa tekniikkaa, jolla pölyämistä hallitaan kuten imukokoojavaunulla. Näin ollen pölyämiselle suotuisissa olosuhteissa päästöjen massapitoisuudet saattavat olla erittäin suuret. Luultavasti taulukon 2.5 oletus imuvaunun ja mekaanisen kokoojavaunun yhtenevästä hiukkaskokojakaumasta ei ole kovin tarkka arvio, koska mekaaninen turpeenostoprosessi ja turvekenttä luovat otolliset olosuhteet isojen pölyhiukkasten synnylle [75]. Oletettavasti mekaanisen kokoojavaunu hihnatekniikoineen emittoi suhteellisesti imukokoojavaunua enemmän isoja hiukkasia ja vähemmän pieniä hiukkasia.

Taulukko 2.5. Eri työvaiheiden päästökertoimia eri hiukkaskokoluokille. Lihavoidut arvot ovat mitattuja arvoja ja normaalilla fontilla taulukoidut arvot ovat mitattujen arvojen avulla laskettuja arvoja. Taulukko on tehty lähteen [40] avulla.

Toiminto	PM2.5 (g/s)	PM10 (g/s)	TSP (g/s)
Jyrsintä	1,6	2,3	3,5
Kääntö	4,7	6,7	10,2
Karheaminen	2,1	3,0	4,6
Hakumenetelmä (kuormaus)	8,0	10,9	30,4
Imuvaunu (JIK-40)	2,5	3,5	5,4
Mekaaninen kokoojavaunu	3,4	4,9	7,5

2.4 Turvepölyn kulkeutuminen ja haitat

Ilmatieteenlaitoksen Kortesuolla vuonna 1998 tehdyssä arviossa [27] korkein vuorokausikeskiarvo mitatulle leijuvalle pölylle (TSP) tuotantoalueen välittömässä läheisyydessä oli noin $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja noin 2 km säteellä pitoisuudet olivat enää noin $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tämän TSP-pitoisuuden arvioitiin olevan lähes kokonaan PM10 hiukkaspölyä. Jo lyhytaikaiset ulkoilman hiukkaspitoisuuksille altistumiset voivat vaikuttaa terveyteen myös matalilla, alle $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hiukkaspitoisuuksilla. Terveysvaikutukset liittyvät selkeimmin PM2.5 ja PM10 hiukkasten määrään ja vain heikosti TSP-pitoisuuteen. Voidaan siis todeta, että $D_p < 10 \mu\text{m}$ kokoiset hiukkaset aiheuttavat ihmiselle terveyshaittoja. Koska Suomessa tuotantoalueiden lähellä asuu vähän ihmisiä ja tuotantopäiviä on vähän vuodessa, myöskään turvepölyn vaikutuksia ei voida Suomessa tilastollisesti havainnoida. [65]

Kooltaan $30 \mu\text{m}$:n hiukkaset eivät kulkeudu ihmiskehossa yleensä päätä pidemmälle, eli ne törmäävät ja depositoituvat ennen hengityselimiä [56]. Näin ollen voidaan sanoa, että kokoluokan $D_p > 30 \mu\text{m}$ hiukkaset tuottavat ihmisille lähinnä viihtyvyshaittoja ja kosmeettisia haittoja. Pölyisimpinä aikoina turvepölyn laskeuma yksin voi ylittää viihtyisyshaittarajan ($10 \text{ g}/\text{m}^2/\text{kk}$) noin 100 m etäisyydellä tuotantoalueen reunasta. Haitan esiintyminen yli 100 m etäisyydellä tuotantoalueenreunasta riippuu taustalaskeuman suuruudesta siten, että noin 300 m etäisyydellä turvepöly voi muodostaa yli puolet haittaa aiheuttavasta pölymäärästä. [39]

Toisaalta esimerkiksi Kortesuolla Ilmatieteenlaitoksen turpeen pölyämistä koskevassa tutkimuksessa laskeumat olivat tuotantoalueella suuruudeltaan noin $3,4 \text{ g}/\text{m}^2/\text{kk}$, eli selvästi alle viihtyvyshaittarajan. Laskeumat olivat suuruudeltaan sadan metrin päässä tuotantoalueesta 71 %:a ja 200 metrin päässä tuotantoalueesta 57 %:a alkuarvostaan. [27] Turvepölyn aiheuttaman viihtyvyshaitan suuruus on siis aluekohtaista ja saadut arvot riippuvat myös mittauksista.

Hiukkasten kulkeutuminen on vahvasti sidoksissa hiukkaskokoon, mutta myös ympäristön vaikutus on merkittävä. Esimerkiksi päästökorkeus, ilmakehän stabiilius, tuulennopeus, ja ilmankosteus vaikuttavat siihen. Tutkimuksessa [79] $5 \text{ m}/\text{s}$ tuuli nostatti tuotantoalueen reunalle noin $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2.5 pölymassapitoisuuden, joka puolittui vasta noin

100 m päässä tuotantoalueen reunasta turpeen kosteuden ollessa 40 %. [79]

Myös suuret hiukkaset voivat kulkeutua kauas varsinkin turveneavan lämmetessä voimakkaasti. Paikallisesti turvetuotantoalue poikkeaa ilmasto-olosuhteiltaan ympäröivistä alueista, koska sen pinta on yleensä tummempi. Tämän vuoksi alue lämpenee ympäristöään voimakkaammin, jonka vuoksi pintakerroksen lämpimän ilman kohotessa voi syntyä termiikki. Tällöin esimerkiksi imuvaunusta lähtevä pölypatsas voi kohota jopa kilometrin korkeuteen. [65] Ilmakehän rajakerroksen ollessa normaalisti muutaman sadan metrin korkeudessa pölypatsas kohoaa rajakerrokseen ja pöly leviää jopa kilometrien päähän.

Tarkastellaan seuraavaksi isojen ja pienien hiukkasten kulkeutumista turvetyöalueelta ympäristöön. Tutkimuksessa Tissari et al, Fine particle emissions from milled peat production [60] keruun aikaisten pölyemissioiden PM_{2.5} hiukkasten massapitoisuus imukokoojavaunun päästökertoimella 2 g/s laskee terveyshaittojen alarajaan $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ noin 60 metrin etäisyydellä lähteestään. Janne Nuutisen tutkimuksessa Turvetuotannon pöly- ja melupäästöt sekä vaikutukset lähialueen ilmanlaatuun [39] imukokoojavaunun ja mekaanisen kokoojavaunun PM₁₀-pölypitoisuuksia on arvioitu melko samaan tapaan kuin tutkimuksessa [60]. Siinä imuvaunun emittoima noin $310 \mu\text{g}/\text{m}^3$ massapitoisuus laimenee noin 70 metrin etäisyydellä tuotantoalueen reunasta arvoon $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mekaanisen kokoojavaunun päästöt ovat huomattavasti suuremmat: 50 metrin etäisyydellä tuotantoalueen reunasta mekaanisen kokoojavaunun emittoima pölypitoisuus on vielä hieman alle $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tämä massapitoisuus laimenee vasta noin 250 metrin etäisyydellä arvoon $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [39] Molemmissa edellä viitatuissa tutkimuksissa on käytetty tavanomaisia suomalaisen kesäpäivän olosuhteita, joissa tuulennopeus on 3 m/s ja lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [39, 60]. Niistä huomataan, että turvehiukkaset leviävät melko kauas normaaleissa olosuhteissa ja normaaleilla päästöillä.

Pohditaan seuraavaksi suurien hiukkasten kulkeutumista. Yaran selvityksen mukaan halkaisijaltaan $30 \mu\text{m}$ kokoiset mineraalipölyhiukkaset eivät työmaalla kulkeudu pidemmälle kuin $30 - 90$ metrin päähän lähteestä [42]. Mineraalipölyhiukkasen tiheys on noin $2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$ turvehiukkasen tiheyden ollessa $1 - 2 \text{ g}/\text{cm}^3$ [78]. Vaikka turvepöly on tiheydeltään hieman harvempaa, voidaan olettaa, että se käyttäytyy lähes samalla tavalla, kuin mineraalipöly. Esimerkiksi tutkimuksessa [78] turvepölyn leviämistä on simuloitu mineraalipölyhiukkasen tiheydellä. Yhdysvaltain sosiaali- ja terveysministeriön pölynhallintaoppaan mukaan hiukkaskoot $D_p > 60 \mu\text{m}$ eivät pysy ilmassa kauaa. Ne saavuttavat noin metrin korkeuden emissiolähteeseensä nähden, jonka jälkeen ne laskeutuvat maahan [4].

Hiilihiukkanen on turve- ja mineraalipölyä huomattavasti tiheydeltään harvempi hiukkanen. Sen efektiivinen tiheys on noin $0,3 \text{ g}/\text{m}^3$ [77]. Insinööritoimisto Paavo Ristola selvitti vuonna 1991, että $100 \mu\text{m}$:ä suuremmat hiilihiukkaset, eivät päädy merkittävälle etäisyydelle varastosta kaupunkiolosuhteissa [23].

Suurilla hiukkasilla hiukkaskoon kasvaessa sen putoamisnopeus kasvaa eksponentiaalisesti. Tutkimuksen [27] mukaan $10 \mu\text{m}$:n turvehiukkaselle putoamisnopeus on noin $0,3$

cm/s kun taas $30\text{ }\mu\text{m}$:n hiukkaselle putoamisnopeus on noin 3 cm/s. Sen kokoisille ja suuremmille hiukkasille myöskin depositionopeudet ovat samat, kuin putoamisnopeudet, eli $D_p > 30\text{ }\mu\text{m}$ hiukkaset poistuvat ilmastä lähinnä gravitaation vuoksi. Kun hiukkaskoko on $100\text{ }\mu\text{m}$ sen putoamisnopeus on lähes 30 cm/s. [27]

Edellisten tietojen pohjalta arvioidaan seuraavaksi millaisiin hiukkaskokoihin pölynhallintajärjestelmien tulisi keskittyä esimerkiksi turvenevoilla. Poikkeusolosuhteita lukuun ottamatta, vain $D_p < 10\text{ }\mu\text{m}$ kokoluokan turvehiukkasten tiedetään kantautuvan tehokkaasti kauas lähteestään ja aiheuttavan ihmisille terveyshaittoja. $D_p > 30\text{ }\mu\text{m}$:n hiukkaset taas poistuvat ilmastä melko nopeasti gravitaatiovuorovaikutuksen vuoksi, eivätkä ne aiheuta terveyshaittoja ihmisille. Tämän vuoksi turvenevoilla vesisumutuksen olisi erityisesti laskeutettava ilmastä hiukkasia, joiden kokoluokka on $D_p < 30\text{ }\mu\text{m}$. Kappaleen 2.3 taulukon 2.4 tutkimukset, Yaran raportti, insinööri-toimisto Paavo Ristolan selvitys ja Yhdysvaltain sosiaali- ja terveysministeriön pölynhallintaopas huomioon ottaen voidaan suurella varmuudella arvioida, että pölynhallintalaitteiston tulisi tehokkaimmin sitoa PM10 hiukkasia, eikä sen tarvitse olla tehokas pölyn hallinnassa, jonka hiukkaskoko on $D_p > 60\text{ }\mu\text{m}$.

2.5 Pölytutkimus turve- ja maatalousalalla

Tässä kappaleessa käsitellään turve- ja maatalousalan pölyämistutkimuksen käytännön sovelluksia ja mittalaitteita referoiden ja arvioiden aikaisempia tutkimuksia. Erityisesti käydään läpi opinnäytetyön näkökulman kannalta tärkeimpiä tähän mennessä tehtyjä suomalaisia turvepölytutkimuksia. Referaatit tehtiin mittausteknisestä näkökulmasta, jotta saatiin selville, miten aikaisemmassa tutkimuksessa on mitattu pölypäästöjä maatalouden ja turvetuotannon osalta. Mikäli mittausasetelmasta ei ollut paljoa tietoa tai siinä ei ollut mitään erikoista, keskityttiin referoinnissa lähinnä mittauslaitteiden käyttöön ja mal-leihin.

2.5.1 Kuopion yliopiston turvepölymittaukset kesällä 1999 Kaikonsuolla

Tämän alikappaleen teksti on referoitu tutkimuksesta Yli-Tuomi et al. [79]. Siinä imuvaunujen JIK-40 ja JIK-35 hiukkaspäästöjä ja kokojakaumia mitattiin eri turvesaroilla- ja laaduilla, JIK-40:stä syklonin poistoputken päästä ja JIK-35:llä poistokanavan päästä. Mittauksen aikana imuvaunut keräsivät turvetta normaalisti.[79]

Ennen varsinaisia mittauksia mitattiin poistoilman nopeusjakauma ja tehtiin hiukkaskoon esimittaukset. Imuvaunujen poistoilman virtausnopeudet määritettiin S-tyyppin Pitot-putkella ja Alnor MP6KAV-mikromanometrillä. Pitot-putki kalibroitiin Walclac Oy:n termomanometrillä ja mittauksissa noudatettiin soveltuvin osin SFS 3866 standardia. Nopeusjakaumat määritettiin puhtaalla ilmalla imuvaunun puhaltimen kierrosnopeuksilla 1800 –

2000 rpm. Keräysvaunujen poistokaasun tilavuusvirraksi arvioitiin $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ja sen oletettiin jakautuvan tasaisesti sykloneiden kesken. Poistoilman nopeusjakauman keskiarvon mitattiin olevan 125 mm:n etäisyydeltä poistoputken suuaukon keskiakselista. Isokineettinen näytteenotto tehtiin sondin vaihdettavilla suukappaleilla ja ohjelmoitavilla pumpuilla (PQ-100, BGI Inc.). Pumput kalibroitiin BUCK-kuplakalibraattorilla.[79]

Hiukkaspitoisuus ja hiukkaskokojakauma esimitattiin Bird & Tole Ltd kaskadisenetripedillä leikkausrajoilla 1,6; 4,6; 15,9 ja 59,8 μm . Näytteet otettiin kaikista neljästä syklonista yhdenmukaisesti 125 mm:n etäisyydeltä kanavan keskiakselista.[79]

Varsinaisissa pölymittauksissa syklonin päähän asetettiin laminaattori tasoittamaan virtausta. Hiukkaskokojakauma mitattiin samoin, kuin esimittauksissa. Mittauksissa mitattiin hiukkasjakamaa myös Dekati PM10/2.5-impaktiokeräimellä. Sentripedin ollessa samaan aikaan mittauksissa mukana molemmat laitteet asetettiin 75 mm etäisyydelle syklonin poistokanavan keskiakselista ja laitteiden paikkaa vaihdettiin mittausten välissä. Näytteet kerättiin 20 mm:n lasikuitusuodattimilla (Whatman GF/A) käyttäen pohjasuodattimina 57:mm:n lasikuitusuodattimia Pallflex 2500QAT-UP ja täysmikrova'alla (Mettler-Toledo AG). JIK-40 imuvaunun PM2.5 päästöt mitattiin samanaikaisesti PM10:n kanssa. Pölynäytteet kerättiin 47 mm kvartsisuodattimelle (Pallflex 2500QAT-UP).[79]

Imuvaunujen kokonaispäästön TSP mitattiin keräämällä 25 x 100 mm Munktell ET/MG 160 lasikuitusuodattimilla pölyä. Suodatin punnittiin ennen ja jälkeen näytteenottoanalyysin Sartorius vaa'alla.[79]

Tutkimuksessa onnistuttiin mittaamaan imuvaunun poistokanavan suuaukolta turpeen keruun aikaiset pölypäästöt. Tämä oli haastavaa, koska mittaus tehtiin kovassa tärinässä ja poistoilman nopeusprofiilia oli tasoitettava laminaattorilla. Merkittävää on, että mittauksilla saatiin kuitenkin melko tarkka arvio poistoilman turvepölypitoisuudelle. Mittausmenetelmällä saatiin määritettyä myös päästöjen kokojakauma ja esimerkiksi pystytettiin havainnoimaan eri turvelaatujen ja eri keruualueiden vaikutusta pölypäästöihin. Vapon työmailla aiotaan tulevaisuudessa mitata myös imuvaunun pölypäästöjä, joten tämän tutkimuksen mittausteknisistä yksityiskohdista saattaa olla hyötyä myös Vapon tulevissa pölymittauksissa.

2.5.2 Tissari et al. tutkimus jyrshinturvetuotannon pölyämisestä Konnunsuolla 2000

Tutkimuksessa Tissari et al., Fine particle emissions from milled peatproduction [60] tutkittiin jyrshinturvetuotannon pölypäästöjä kuudella keräimellä. Keräimet koostuivat EPA-WINS PM2.5 impaktorista (BGI) ja PQ100 pumpusta (BGI). Lisäksi laitteeseen asennettiin joko TSP tai PM10 suuaukko. Keräimistä kaksi laitettiin tuulen alle tuulen suuntaisesti samaan linjaan mittaamaan ohi ajavan työkoneen pölypäästöjä. Yksi keräin asetettiin tuulen yläpuolelle, kahden muun keräimen kanssa linjaan mittaamaan taustapitoisuutta.[60]

Molemmat tuulen alla olevista keräimistä mittasivat PM2.5 pitoisuuksia ilmassa virtausnopeuden ollessa 16,7 l/min. $D_p > 2,5 \mu\text{m}$ hiukkaset kerättiin Whatman tai Gleman Sciences lasikuitu suodattimella ja $D_p < 2,5 \mu\text{m}$ kerättiin Gelman Sciences *Teflo*TM 2 μm huokois-kokofiltterillä. PM2.5-hiukkasten lisäksi toinen tuulen alapuolella olevista keräimistä mit-tasi TSP-hiukkasia toisen kerätessä PM10-hiukkasia. TSP suuaukolla varustettu keräin asetettiin 1,2 m korkeudelle ja PM10 suuaukolla varustettu keräin asetettiin 1,9 m korkeu-delle.[60]

Tutkimuksessa mielenkiintoista oli, että mittalaitteet asetettiin eri korkeuksille mitattavan kokoluokan mukaan. Tämä kertoo siitä, että mittauskorkeuden valinta voi vaikuttaa mer-kittävästi mittalaitteelle leijuvien hiukkasten kokojakaumaan ja tätä kautta mitattavaan tu-lokseen. Mittauksissa päästökertoimen selvittämiseksi käytettiin hajapölypäästö mallin-nusta (engl. Fugitive Dust Model). Tätä mallia voisi tulevaisuudessa käyttää myös hyö-dyksi turvepölyn jahtausmittauksissa, koska myös jahtausmittauksissa mittausetäisyys vaihtelee, jolloin eri etäisyyksiltä tehdyt mittaukset saataisiin vertailukelpoisemmiksi mal-lin avulla.

2.5.3 Rambollin turvepölymittaukset Lantonsuolla ja Sammalistonsuolla 2016-2018

Rambollin raporttiluonnoksessa Turvetuotannon ja mekaanisen kokoojavaunun pölypääs-töselvitys [16] mittaukset tehtiin Lantonsuolla ja Sammalistonsuolla jatkuvatoimisilla op-tisilla Osiris-mittareilla (Turnkey Instruments Ltd), jotka toimivat $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$:n mittaustark-kuudella. Toiminnan aikaisten mittausten mittaustiheydeksi asetettiin 1 minuutti.[16]

Tutkimuksessa tehtiin ohiajomittauksia, joissa mekaaninen kokoojavaunu ajoi mittapis-teen ohi tietyltä etäisyydeltä. Tulosten laskennassa ohiajoa edustavat hiukkaspitoisuudet on laskettu keskiarvoina käyttäen kolmen minuutin kestoisia ajanjaksoja ohiajojen hetkil-tä. Ilmoitetut Mittalaitteiden etäisyydet ohiajojen hetkellä lähteeseen nähden olivat 15, 37 ja 50 m ja mittalaitteet olivat 1,5 m korkeudella maanpinnasta. Ohiajomittauksia tehtiin sekä ilman keräystä että keräyksen aikana. Ohiajomittausten aikaiset taustapitoisuudet olivat huomattavan korkeat, paikoin jopa korkeammat kuin ohiajomittausten pölymassa-pitoisuudet.[16]

Tutkimuksessa tutkittiin myös paljon muita asioita, kuin mekaanisen kokoojavaunun ohia-joja. Joka tapauksessa ohiajoista saatiin hyvin vähän dataa ja se oli melko sattumanva-raista. Myös tuulen heittäminen vaikutti mittauksiin. Tämän vuoksi, mikäli mittaustietoa halu-taan yksittäisen koneen päästöistä, voisi erityisesti tällaisissa tilanteissa opinnäytetyössä esitellyistä jahtausmittauksista olla hyötyä.

2.5.4 Symo Oy:n kirjallisuusselvitys turvetuotannon pöly- ja melupäästöistä

Janne Nuutisen kirjallisuusselvityksessä Turvetuotannon pöly- ja melupäästöt sekä vaikutukset lähialueen ilmanlaatuun [39] on kartoitettu eri tutkimuksissa arvioituja turvetyömaiden pöly- ja melupäästöjä ja pölypäästöjen vaikutuksia lähialueen ilmanlaatuun. Selvityksessä esitellään TSP-pölyn mittaamisessa käytetty standardisoitu tehokeräysmenetelmä (SFS 3863), jossa tunnettu määrä mittaushiljaa imetään suodattimen läpi. Mittaustuloksena saadaan keskimääräinen hiukkasten massapitoisuus kerääntyneen pölymassan ja imetyn ilmatilavuuden suhteena ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Tehokeräimeen voidaan liittää laitteistoja, jotka jakavat pölyn eri kokoluokkiin (TSP, PM10 ja PM2.5). Selvityksen mukaan hengitettävän pölyn (PM10) näytteenottoon ja analyysiin käytettävät vertailumenetelmä on esitetty standardissa EN 12341. Näytteenotto voidaan tehdä myös vertailumenetelmän ekvivalenttimenetelmillä, joilla mitattuja tuloksia on korjattava tilanteenmukaisella kertoimella. Yksi esimerkki ekvivalenttilaitteistosta on PQ - 100 PM10 sampling system mittaustilaitteisto. Edellä mainittujen menetelmien puute on, että laitteet eivät mittaa aerosolia reaaliaikaisesti, kuten esimerkiksi optiset mittalaitteet.

Selvityksestä löytyy tutkimus [40], jossa on tutkittu turvetuotantoalueen ilmanlaatua Isonnevalle optisella mittalaitteella vuonna 2007. Näissä mittauksissa käytettiin standardoidun tehokeräysmenetelmän sijaan optista keräintä LAP-analyysaattoria (Laser Aerosol Particle Size Spectrometer320, Topas GmbH). Laite mittasi kokojakaumaa 0,3 – 20 μm yksittäisten hiukkasten sirontaan perustuen. Menetelmän etuna on sen herkkyys korkeilla hiukkaspitoisuuksilla. Kokonaishiukkaspitoisuuden mittaussylärajana mittalaitteella on 10^5 hiukkasta/ cm^3 . [40]

Selvityksessä mielenkiintoista on, että perinteisten massaan perustuvien mittaussmenetelmien ohella tutkittiin myös optista menetelmää turvepölyn mittaamisessa. Optisen menetelmän käyttö aiheen mukaisissa mittauksissa voi aiheuttaa haasteita, koska mittaustulokset ovat riippuvaisia hiukkaskokojakaumasta ja hiukkasten optisista ominaisuuksista. Selvityksen mukaan kuitenkin optisella mittalaitteella pystyttiin kalibroinnin jälkeen mittaamaan tarkkoja tuloksia. Lisää ulkoilman mittaamiseen käytettyjä optisia mittalaitteita ja muita erilaisia mittalaitteita esitellään liitteessä B.

2.5.5 LIDAR:iin ja pistemittauksiin perustuvat pölyämismittaukset maanviljelyssä

Esimerkiksi USA:ssa on kiinnitetty huomiota siihen, että pelkillä pistemittalaitteilla mitatut tulokset eivät anna kattavaa kokonaiskuvaa pölypilvestä, koska ne mittaavat vain pienen alueen konsentraation tietystä paikasta tiettyinä ajanhetkinä. Ongelma on ratkaistu LIDAR:iin perustuvilla mittaussmenetelmällä. LIDAR on lyhenne englanninkielisistä sanoista Light Detection and Ranging. Tutkimuksissa LIDAR-mittaukset ja pistemittaukset eri kor-

keuksilla monesti täydentävät toisiaan. Seuraavaksi referoidaan kolmea yhdysvaltalaisista maanviljelyn pölypäästöihin liittyvää tutkimusta mittaustekniikoita ja mittauslaitteita painottaen.

Määritellään ensimmäisenä LIDAR-tutka. LIDAR-tutka on optinen mittalaite, joka lähettää laser-valopulsseja mitattavaan kohteeseen. Valopulssin sirotessa kohteesta takaisin LIDAR:iin sen sensori mittaa heijastuneet pulssit. Eroavaisuudet laserpulssien heijastumismatkoissa ja aallonpituuksissa mahdollistavat mitattavan kohteen 3D-mallintamisen. [19, 41] LIDAR-tutkan tarkkuus riippuu aallonpituudesta ja sillä voidaan mitata myös pieniä kohteita, kuten aerosoleja. LIDAR teknologialla toimiva aerosolimittalaite on nimeltään celiometri. Sillä voidaan mitata aerosolipilven korkeus, konsentraatio (vahva korrelaatio PM10:n kanssa) ja pitkittäinen näkyvyys. Lisäksi sillä voidaan mitata ilmakehän sekoituskerroksen korkeus, sadanta, tuuliprofiilit, aerosoliprofiilit ja kaasun konsentraatioprofiilit, kuten kosteus ja otsoni.[34]

Tutkimuksessa Holmen et al. (2001) mitattiin puuvillapellon äestysten aikaista PM10-konsentraatioprofiilia LIDAR-mittalaitteella. Traktori äesti pellolla muutaman sadan tai kymmenen metrin päässä mittalaitteista. Kentän laitaan asetettu LIDAR-mittalaite mittasi vertikaalisen pölyn konsentraatioprofiilin, jonka jälkeen tuulen kuljettama pöly jatkoi matkaansa kolmelle kiinteän paikan omaavalle mittaustornille. Mikäli äestystä tehtiin kaukana mittaustorneista, tehtiin pistemittaus liikuteltavan mittaustornin avulla, joka tuotiin lähelle äestyspaikkaa. Mittaustorneille asetettiin eri korkeuksille pistemittalaitteita mittaamaan PM10-konsentraatioita. [19]

Useimmissa LIDAR mittauksissa ilman pölykonsentraatio laski korkeuden kasvaessa. Toiseksi yleisin oli tilanne, jossa kaikilla mittauskorkeuksilla pölyn konsentraatio oli lähes sama. Mittauksissa havaittiin myös vahva korrelaatio pistemittalaitteiden ja LIDAR:in mittamien PM10 konsentraatioiden välille korrelaation ollessa 0,94.[19]

Tutkimuksessa Wang et al. (2009) mitattiin puuvillapellolla äestysten aikaisia pölypäästöjä pistemittalaitteilla. Lisäksi tutkimuksessa pohdittiin kattavasti pölyn dispersiota lähteestä ja sen suhteen tehtävää mittalaitteiden asettelua. Itse mittaukset tehtiin ohiajomittauksina. Näytteenotto alkoi, kun traktori ajoi näytteenottimen ohi muutaman metrin etäisyydeltä riippuen tuulennopeudesta ja suunnasta. Näytteenotin mittasi aina tuulen alapuolella. Näytteenotto jatkui usean minuutin ajan ohituksen jälkeen, mutta vain minuutin ajalta kerättyä dataa käsiteltiin jatkotutkimuksissa, koska mitatut konsentraatiot putoavat melko nopeasti lähelle taustapitoisuuksia ohituksen jälkeen. Traktori pysähtyi pellon päähän, sammutti moottorinsa ja mittaus toistettiin, kun pöly oli poistunut mittauskentältä.[72]

Pölymittauksissa käytettiin sähköistä alipaine kaskadi impaktoria (ELPI, Dekati LTD, Tampere, Suomi) ja mikroaukkoimpaktoria (MOUDI; Malli 110, MSP Corporation, Shoreview, MN). Mittauslaitteet oli kiinnitetty 3-piste kiinnikkeeseen toiseen traktoriin, jolloin niitä oli helppo siirtää. Mittalaitteet olivat mittauksessa aina lähellä (3,7 – 9,8 m) ohiajavan traktorin ajoreittiä, niin että tuuli puhalsi, traktorin ollessa mahdollisimman lähellä mittalaitteita, pölyn suoraan lähteestä mittalaitteeseen. Mittalaitteet olivat korkeudella 1,7 metriä.[72]

Tutkimuksessa esitettiin yksinkertaista approksimaatiota lähteen voimakkuuden (emissio-kertoimen) laskemiseksi:

$$E = \frac{\bar{C}X_0Y_0Z_0}{t}, \quad (2.1)$$

missä E on emissiokerroin (g/s), \bar{C} on pilven keskimääräinen pölykonsentraatio, X_0 on pölypilven leveys, joka saa arvonsa pölyn lähteen leveydestä, Y_0 on pölypilven pituus, joka saa arvonsa laitteiston kulkemasta matkasta yhdessä sekunnissa, Z_0 on pölypilven korkeus, joka riippuu turbulenssista ja t on päästöön kulunut aika. Jos sensorit ovat vain muutaman metrin päässä lähteestä, pölypilvi kulkeutuu niille muutamassa sekunnissa, kun tuulen nopeus oli suurempi kuin 1 m/s. Tässä ajassa pölypilven leviäminen horisontaalisesti on merkityksetöntä, jolloin X_0 ja Y_0 oletettiin vakioksi.[11]

Tuulen suunnassa tapahtuvalla lyhyellä mittausmatkalla ja siitä seuraavalla pölyn vähäisellä maan suuntaisella dispersiolla perusteltiin ohiajomittausten oleva validi tapa pölykonsentraatioiden mittaamiseen. Nyrkkisäännöksi esitettiin, että mittalaitteiden tulee olla tuulen alla korkeintaan 4 s pölyn kulkeutumisajan päästä mitattavasta lähteestä. Eli esimerkiksi tuulennopeuden ollessa 2 m/s mittauspiste voidaan asettaa maksimissaan 8 m päähän lähteestä tuulen alle. Regressioanalyysissä ei havaittu näiden mittausten pohjalta laskettujen päästökertoimen suuruuden korreloivan meteorologisten parametrien kanssa. Toinen merkittävä havainto oli, että 92 % TSP-hiukkasista oli PM10 hiukkasia. [72]. PM2.5 hiukkasten pitoisuuksia ei mitattu tutkimuksessa, mutta melko saman kaltaises- sa tutkimuksessa Holmen et al. 2007 saatiin samoilla mittalaitteilla korkeudella 1,5 m PM2.5/PM10 suhteeksi noin 0,50, eli puolet PM10 hiukkasista oli PM2.5 hiukkasia [18]

Tutkimuksessa [72] arveltiin, että mittalaitteiden läheinen etäisyys suhteessa työkoneen reittiin mahdollisti tarkemman konsentraation mittaamisen kuin aikaisemmissa tutkimuk- sissa. Tutkimuksessa [18] tehtiin LIDAR-mittauksia, joissa havaittiin pölypilvien korkeuden riippuvan ilmaston stabiiliudesta. Epästabiilissa ilmastossa hiukkaset kohoavat korkealle, kun taas stabiileissa ja neutraaleissa olosuhteissa suurin osa hiukkasista pysyy lähellä maan tasoa. [18]

Tässä alikappaleessa esitelty LIDAR-teknologia ei liity opinnäytetyön mittauksiin suo- raan, mutta sen käytön mahdollisuus on hyvä tiedostaa, kun suunnitellaan moderneja pölymittauksia. Sen sijaan monia muita tämän referaatin asioita käytettiin suoraan opin- näytetyön mittauksissa ja muissa selvityksissä, kuten emissiokertoimen määrittystä ja sii- hen liittyvää tuulennopeudelle kehitettyä 4 s sääntöä sekä mittauslaitteiden korkeutta 1,5 m.

3 PÖLYNHALLINTA VESISUMULLA JA PÖLYNHALLINTAJÄRJESTELMÄN TESTAUS

Tässä luvussa perehdytään vesisumuun ja sen käyttöön pölynhallintamenetelmänä. Kappaleessa 3.1 kerrotaan teoriaan pohjautuvasti, miten vesisumutus toimii pölynhallinnassa sekä tekijöistä, jotka vaikuttavat vesisumun pölynsidontatehoon. Kappaleessa 3.2 kerrotaan vesipisaroiden muodostumisesta, haihtumisesta ja elinajasta ilmassa. Kappaleessa 3.3 esitellään Vapo Oy:n mekaaniseen kokoojavaunuun ja imu kokoojavaunuun asennattama pölynhallintajärjestelmä ja kappaleessa 3.4 esitellään sille tehdyt vedenkulutuskoekäytännöt.

3.1 Vesisumu pölynhallinnassa

Vesisumua käytetään pölyn hallintaan kahdella tavalla: joko vesisumu kohdistetaan pölynlähteen pintaan tai vesisumu suihkutetaan ilmassa leijuvan pölyn sekaan. Tehokkaimmin vesisumulla pystytään vaikuttamaan pölypäästöihin, kun molemmat menetelmät ovat yhtä aikaa käytössä. Vesisumutuksessa pölyhiukkaset törmäävät sumun vesipisariin, jolloin pisarat keräävät hiukkasia itseensä. Vesipisaran agglomeroitessa pölyhiukkasia se putoaa gravitaation vuoksi maahan. Vesipisaran keräystehokkuus ilmassa riippuu mm. pisaran ja pölyhiukkasen koko- ja nopeuserosta sekä vedessä käytetyistä kemikaaleista.[56]

Alla olevaan taulukkoon 3.1 on tiivistetty tämän kappaleen keskeiset asiat vesisumun ominaisuuksista pölynsidonnassa. Taulukossa kuvataan, millainen yksittäisen vesisumun ominaisuuden pitää olla, että se aiheuttaa teoriassa parhaan pölynsidontatuloksen. Käytännössä osa suureista riippuu toisistaan, esimerkiksi vesisumun käyttöpaineen kasvatus kasvattaa sumutuskulmaa ja veden virtausnopeutta. Käyttöpaineen kasvatus parantaa pisarakoon pienenemisen ja pisaran nopeuden kasvamisen vuoksi pölynsidontatehoa, kun taas sumutuskulman laajentaminen yleensä alentaa sitä.

Laboratio-olosuhteissa pölynsidontaan tarkoitetun vesisumun pisarakoko on yleensä pieni, noin 20 μm . Tällöin vesisumun tehollinen vaikutusetaisyys lyhyt, huomattavasti alle 0,1 m [13]. Tästä syystä vesisumun vaikutus tehostuu huomattavasti, kun pölyn lähde on vesisumun välittömässä läheisyydessä. Pienipisaraisellakin vesisumulla voidaan suuntaa pölypilveä tehokkaasti oikealla suutinvalinnalla ja paineella [47]. Tämän vuoksi

Taulukko 3.1. Vesisumutuksen keskeisiä ominaisuuksia ja niiden vaikutukset pölynsidontaan.

Ominaisuus	Määritelmä	Vaikutus
Suuttimen kulma	Kulma, joka määrittää vesisumukuvion leveyden.	Pölynsidontatehon pieneneminen liittyy suuttimen kulman suurenemiseen [47].
Veden virtausnopeus	Veden tilavuus, joka virtaa suuttimen läpi aikayksikössä.	Korkea pölynsidontateho liittyy veden virtauksen kasvattamiseen [4].
Etäisyys	Etäisyys pölypilven tai pölyn lähteen ja suuttimen välillä.	Pölynsidontan tehostamiseksi etäisyys minimoidaan sumutuskulma ja tehollinen etäisyys sekä käytännön olosuhteet huomioon ottaen [10].
Paikka	Suuttimen sijainti suhteessa pölypilveen.	Paras pölynsidontateho saavutetaan paikasta, josta sumu osuu pölypilven konsentroituimpaan kohtaan tehokkaalta etäisyydeltä [4].
Pisarakoko	Keskimääräinen pisaran halkaisija vesisumussa. Voidaan määritellä myös keskimääräisen pisaratilavuuden halkaisijana.	Vesipisaran ja hiukkasen törmäys ilmassa tapahtuu todennäköisimmin, jos ne ovat samaa kokoluokkaa [59]. Mikäli sumutusetäisyyden halutaan olevan suuri, pisaran koko suhteessa pölyhiukkaseen voi olla suurempi, jopa satakertainen [7].
Nopeus	Pisaran nopeus suhteessa pölyhiukkaseen.	Nopeuseron kasvattaminen parantaa pölynsidontatehokkuutta [7].
Tensidi	Veden pintajännitystä alentava kemikaali.	Tensidin lisäys voi parantaa pienten alle $2\ \mu\text{m}$ kokoisten hiukkasten pölynsidontatehokkuutta riippuen kemikaalin valinnasta ja pölyhiukkasten ominaisuuksista [57].

teollisuudessa emittoitunut pöly johdetaan yleensä vesisumun purkautumiskohtaan [56].

Hiukkasten tarttumista vesisumuun voidaan tehostaa vesisumun sähköisellä varaamisella. Markkinoilla on sähköisen varauksen luovia suuttimia. Sumutussuuttimien tehokkuutta on tutkittu paljon kaivoskäytävien pölynhallinnassa sekä laboratoriokokein. Tehdyissä kokeissa on havaittu, että vesisumun sähköinen varaus tehostaa vesisumun pölynerotusvaikutusta monissa käyttötapauksissa [56]. Vesisumun puhdistustehoa voidaan kuvata sen puhdistaan ilman ja puhdistamiseen käytetyn veden tilavuuden suhteella. Tyypillisesti pelkällä käsittelemättömällä vesisumulla pystytään puhdistamaan ilmaa noin $4 - 8\ \text{m}^3$ vesilitraa kohden [56]. Vastaavasti litralla sähköisesti varattua vesisumua puhdistetaan $10 - 14\ \text{m}^3$ ilmaa [56]. Tässä työssä sähköisen varauksen luovia suuttimia ei kuitenkaan ollut käytössä, joten sähkövarausken vaikutusta pölynhallintaan ei tässä työssä tutkita.

Tässä kappaleessa käsitellään tämän opinnäytetyön aiheen kannalta olennaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat painevesipumpun vesisumun pölynsidontatehokkuuteen. Näitä tekijöitä ovat vesisumun ominaisuudet kuten kokojakauma, pitoisuus ja nopeusjakauma. Ul-

koilman olosuhteista tärkeä vaikuttava tekijä pölynsidonnassa on ilman virtausnopeus. Sumutuslaitteiston ominaisuuksista tärkeimpiä vaikuttavia tekijöitä ovat käyttöpaine ja suutintyyppi- ja määrä sekä suutinten etäisyys ja suuntautuminen suhteessa pölylähteeseen.

Turvepölyn hallinnasta vesisumulla on vähän tietoa, mutta hiilikaivoksissa tapahtuvan pölyämisen hallintaa vesisumulla on tutkittu runsaasti. Kaivosten ilman hiilipölyä on pystytty vähentämään 20 – 60% keskimääräisen arvon ollessa 30 % [35]. Tämä vähennys on laskettu ilmassa leijuvien pölyhiukkasten lukumääräpitoisuuden vähenemästä. Pölyn vähenemä perustuu usein suurimmaksi osaksi pölyhiukkasten syntymisen estämiseen, eikä niinkään pölyhiukkasten sidontaan ilmasta. Tällöin vesisumua sumutetaan suoraan pölyävän hiilen päälle, niin, että se samanaikaisesti sekä vähentää pölyn muodostumista että sitoo ilmassa leijuvia pölyhiukkasia [59]. Pölyhiukkasten sidonta ilmasta ilman pölyävän materiaalin kastelua voi kuitenkin olla tehokasta varsinkin isoille $D_p > 5 \mu\text{m}$ hiukkasille [7]. Laboratorio-olosuhteissa on saavutettu huomattavasti suurempia pölynkeräystehokkuuksia myös pienille hiukkasille kokeilemalla menetelmiä, jotka eivät ole vielä teollisuudessa yleisesti käytössä [59]. Tästä esimerkkinä mainittakoon tensidit, joihin tehdään katsaus alikappaleessa 3.1.2. Oikean vedenpaineen, pisarakoon ja suuttimen valinta tilanteeseen sopivasti vaikuttaa merkittävästi ilmassa leijuvien hiukkasten keräystehokkuuteen vesisumulla.

3.1.1 Vesipisaran koon ja nopeuden sekä veden paineen ja kulutuksen vaikutus pölynsidontatehokkuuteen

Tässä alikappaleessa tarkastellaan ilmassa leijuvien hiukkasten ja pisaroiden välisiä vuorovaikutuksia. Sovelluksissa, joissa hallitaan vesisumulla ilmassa leijuvaa pölyä, yleensä sekä pölyhiukkaset että vesipisarat liikkuvat tietyllä nopeudella. Tarkastelun yksinkertaistamiseksi perehdytään seuraavaksi hiukkasten ja vesipisaran väliseen vuorovaikutukseen, kun vesipisara leijuu paikoillaan ilmassa ja hiukkaset liikkuvat ilmassa kaasun virtaviivojen mukaisesti.

Tämän kappaleen alussa mainittiin noin $20 \mu\text{m}$ pisarakoon olevan yleensä käytössä laboratorioissa tehtävissä vesisumutuskokeissa. Tämä koko on tarpeeksi pieni, jotta kuvan 3.1 mukaisia hiukkasen ja pisaran välistä vuorovaikutusta tapahtuu, mikäli sumutus tehdään pölypilven välittömässä läheisyydessä ja pölyn hiukkaskoko on keskimäärin muutamien mikrometrin luokkaa. Pisarakoon pienentyessä pisara myös pysähtyy nopeammin ilmassa kuin iso pisara, minkä vuoksi pisarakoko $20 \mu\text{m}$ ei ole yleensä vesisumutussovelluksissa optimaalinen pölynsidontan kannalta [54]. Hiukkasen hitauteen perustuva vesipisaraan törmäys on yleisesti hyväksytty selitys vesisumun pölynsidontaan ilmasta koolle $D_p > 0,5 \mu\text{m}$ [7]. Tällöin esimerkiksi tutkimuksessa [7] suurikokoinen pisara liikkuu ilmassa suurella nopeudella pitkiä matkoja ja törmäyttää itseensä myös huomattavasti pienempiä hiukkasia. Vesipisaroiden pölynsidonta perustuu myös muihin vuorovaikutuk-

siin, esimerkiksi tarttuminen, jota havainnollistetaan kuvasta 3.1. Muita hiukkasen sitoutumistapoja vesipisaraan ovat termoforeesi Brownin diffuusioliike ja sähköisyyden vuoksi tapahtuva puhdistuminen. Näitä ei tarkastella tässä opinnäytetyössä, koska turvepölyn ja vesisumun välinen vuorovaikutus tapahtuu suurten hiukkas- ja pisarakokojen vuoksi lähinnä niiden välisinä törmäyksinä ja takertumisina, kuten tutkimuksessa [2] esitetään. Myöskin sähköisen vuorovaikutuksen osuus törmäysten aiheuttajana voi olla merkittävä, mikäli turvehiukkasilla on korkea pintavaraus ja vesisumu varataan sähköisesti. Aiheen rajauksen vuoksi tätä ei kuitenkaan tutkita tämän opinnäytetyön mittauksissa. Sähköisen varauksen vaikutusta pölynsidontaan sivutaan kuitenkin alikappaleessa 3.1.2.

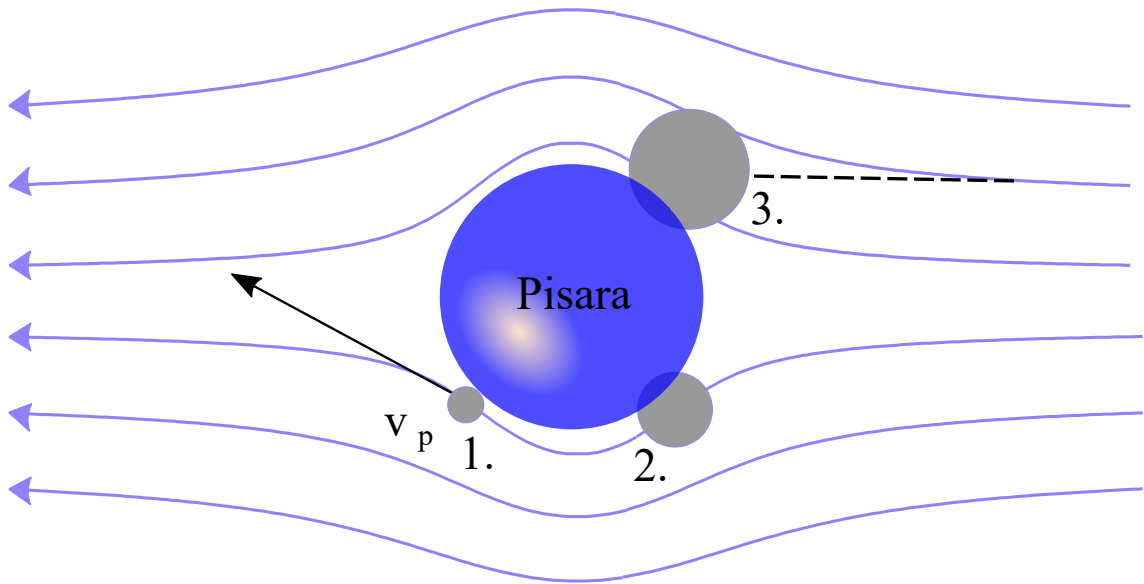
Optimaalinen ilmassa leijuvien hiukkasten pölynsidontatehokkuus saavutetaan yleensä pisarakoolla $10 - 150 \mu\text{m}$ riippuen tilanteesta [4]. Pienenet vesipisarat haihtuvat ilmasta nopeasti, joten $10 \mu\text{m}$ pienemmät pisarat eivät sovellu pienhiukkasten sidontaan [59]. Pisaroiden haihtumisajoista lisää tietoa löytyy alikappaleesta 3.2.2.

Käsitellään seuraavaksi vesipisaran ja hiukkasia sisältävän aerosolin nopeuseron vaikutusta sidontatehokkuuteen. Tutkimuksessa Cheng 1973 todettiin, että mitä suurempi nopeusero on, sitä tehokkaammin vesipisara sitoo hiukkasia ilmasta [7]. Havaintoa voidaan selittää kuvan 3.1 avulla. Kun vesipisaran ja hiukkasen välinen nopeusero on suuri, hiukkanen poikkeaa todennäköisemmin hitautensa vuoksi ilmavirtauksen virtaviivalta ja törmää vesipisaraan. Vesisumu myös sitoo suurella nopeuserolla tietystä pitoisuudesta nopeammin hiukkasia kuin pienemmällä nopeuserolla, eli törmäyksiä tulee aikayksikköä kohden enemmän. Mikäli nopeusero on liian pieni, suurempi osa pölyhiukkasista ehtii dispersoitumaan ympäristöön, eikä sitoudu vesisumuun. Myöskin törmäyksiä tapahtuu pienellä nopeuserolla vähemmän kuin suurilla nopeuseroilla, vaikka pisaran ympärillä leijuvien hiukkasten pitoisuus olisi sama. Samasta suutimesta samalla käyttöpainella sumutettavien pienien vesipisaroiden alkunopeus on suurempi kuin isojen vesipisaroiden mutta nopeus hidastuu voimakkaammin kitkavoimien vuoksi, kun taas isojen pisaroiden alkunopeus pienenee hitaammin ja ne kulkevat ilmassa pidempiä matkoja.[7] Mikäli vesisumua ei voida pieneltä etäisyydeltä suihkuttaa suoraan pölyn emissiolähteeseen, ovat yleensä suuret pisarakoot tehokkaampia ilmassa leijuvien hiukkasten pölynsidonnassa kuin pienet [54].

Esitetään seuraavaksi yksinkertaisen mallin avulla hiukkaskoon, pisarakoon, hiukkaspiitoisuuden sekä pisaran ja hiukkasten suhteellisen nopeuden vaikutusta yksittäisen pisaran pölyhiukkasten keräysnopeuteen törmäys vuorovaikutuksen kautta W. C. Hindsin kirjoittaman kirjan *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles* avulla [17]. Oletetaan, että vesipisara liikkuu ilmassa tietyllä nopeudella ja ilmassa leijuvat hiukkaset ovat homogeenisiä, niiden pitoisuus on vakio ja ne pysyvät paikoillaan. Yksittäinen vesipisara kerää tällöin pienhiukkasia törmäystaajuudella f , joka on riippuvainen edellä mainituista suureista seuraavasti:

$$f = n_a v_s \frac{\pi}{4} (D_p + D_s)^2 \cdot E_c, \quad (3.1)$$

missä n_a on ilmassa leijuvien hiukkasten lukumääräpitoisuus, v_s on vesipisaran nopeus,



Kuva 3.1. Ilmassa paikoillaan leijuva pisara sitoo pölyhiukkasia ympärillä liikkuvasta ilmasta kahdella eri tavalla. Hiukkanen 1. liikkuu ilman virtaviivan mukaisesti pisaran ohi nopeudella v_p . Hiukkaset 2. ja 3. ovat sitoutuneet pisaraan. Hiukkasen 1. on kooltaan pieni suhteessa pisarakokoon, joten se ei tartu pisaraan, vaan kiertää pisaran. Hiukkanen 2 on kooltaan suurempi, joten se tarttuu vesipisaraan liikkeessaan tarpeeksi läheltä vesipisaraa. Hiukkanen 3. on massaltaan suurin, jolloin se erkane hitautensa vuoksi virtaviivalta ja törmää pisaraan.

D_p , on hiukkasten halkaisija, D_s on vesipisaran halkaisija ja E_C on keräystehokkuus. Keräystehokkuus ilmaistaan seuraavasti:

$$E_C = \left(\frac{Stk}{Stk + 0,12} \right)^2, \quad (3.2)$$

jossa Stk tarkoittaa Stokesin lukua. Stokesin luku on määritelty pallon muotoiselle hiukkaselle vesipisaran suhteen seuraavasti:

$$Stk = \left(\frac{C_c \rho_p D_p^2}{18\eta} \right) \cdot \frac{v_s}{D_s}, \quad (3.3)$$

Missä C_c on Cunninghamin korjauskerroin. Sen voidaan arvioida olevan 1 normaaliolosuhteissa, jos mitattavat pölyhiukkaset ovat huomattavasti suurempia, kuin niiden vapaa-matka ilmassa. η on väliaineen dynaaminen viskositeetti. Normaaliolosuhteissa ilman viskositeetti $\eta = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s. [32]. ρ_p on pölyhiukkasen tiheys.

Pisaran alkunopeuteen vaikuttaa veden sumutuspaine, niin että painetta kasvatettaessa myös vesipisaroiden nopeus kasvaa. Veden paineen kasvattaminen tehostaa pölyn-sidontaa nopeuden kasvattamisen lisäksi myös, koska se pienentää sumutettavien pi-saroiden kokoa, eli vesi hajoaa suuttimen pisaranmuodostuksessa hienojakoisemmaksi sumuksi kuin matalalla paineella [7, 25]. Perehdytään seuraavaksi kahden tutkimuksen pohjalta opinnäytetyön kannalta oleellisiin yksityiskohtiin, jotka liittyvät veden käyttöpai-neeseen, sumun pisarakokoon, pisaran alkunopeuteen ja vedenkulutukseen vesisumu-

tuksessa, kun halutaan sitoa ilmasta suuria kooltaan muutaman μm :in pölyhiukkasia. Tutkimukset eivät ole välttämättä suoraan yleistettävissä opinnäytetyön sumutusjärjestelmään, mutta ne antavat suuntaa antavaa tietoa edellä mainittujen parametrien käytännön vaikutuksista.

Tutkimuksessa Cheng 1973 [7] vertailtiin empiiristen mittaustulosten vastaavuutta teoreettiseen pölynsidontamalliin suurilla vesipisaroilla, jotka olivat kokoluokaltaan $100 \mu\text{m}$. Pölynsidontatehokkuus laskettiin vertailemalla hiukkasten lukumääräpitoisuutta ennen ja jälkeen vesisumutuksen. Tutkimuksessa ei tutkittu pölyn muodostumisen torjuntaa, vaan pelkkää leijuvien kooltaan noin $1 - 6 \mu\text{m}$. hiukkasten sitomista ilmasta. Laskennallisessa mallissa hiukkasten liikettä simuloitiin käytävässä, johon suihkutettiin vesisumua niin, että hiukkasia liikuttava ilmavirta oli vastakkaissuuntainen pisaroiden nopeudelle. Mallilla jäljennettiin sumutustornin toimintaa pölynsidonnassa, josta oli aikaisemmissa tutkimuksissa mitattu dataa. Teoreettiset sidontatehokkuudet vastasivat hyvin empiiristä dataa ja olivat keskimäärin samat, kuin esimerkiksi hiilikaivosteollisuuden keskiarvo 30 %. Suurimmille hiukkasille pölynsidontateho oli korkea, esimerkiksi $D_p > 5 \mu\text{m}$ pölyhiukkasilla se oli noin 60 %:a, kun veden suihkutuspaine oli noin 7 – 14 bar. Tehokkuus koon $1 \mu\text{m}$ samoilla paineilla oli kuitenkin vain 20%:a. Näissä kokeiluissa vedenkulutus oli noin $252 \text{ cm}^3/\text{s}$ eli 15 l/min ja pisaran lähtönopeus noin 50 m/s. Karkeana sääntönä voidaan tutkimuksen pohjalta sanoa, että pisarakoon ollessa 100-kertainen pölynsidonta ilmasta tapahtuu tehokkaasti. Tätä voidaan perustella suuren pisaran pitkällä pysähtymismatkalla, jolloin korkean paineen aiheuttaessa pisaralle suuren alkunopeuden se sitoo huomattavan määrän myös pieniä hiukkasia ennen pysähtymistään. Esimerkiksi tutkimuksessa $500 \mu\text{m}$:n vesipisaran pölynsidontatehokkuus $5 \mu\text{m}$ hiukkasille oli hyvä mutta $5 \mu\text{m}$:ä pienemmille hiukkasille pölynsidontateho laski kuitenkin nopeasti. [7]

Tutkimuksessa hieman alkunopeutta 35 m/s suuremmat nopeudet saavutettiin 440 ja $450 \mu\text{m}$:n vesipisaroille 10 ja 14 baarin vedenpaineilla, jolloin pölynsidontatehokkuus oli korkea. Sidontatehokkuuden kasvu hidastui huomattavasti, kun pisaran lähtönopeutta kasvatettiin edellä mainitusta nopeudesta. Vedenpaineen laskiessa noin 7 baarin sidontatehokkuus ei pienentynyt edelliseen verraten merkittävästi mutta noin 4 baarin vedenpaineella sidontatehokkuus oli laskenut jo huomattavasti. [7]

Tutkimuksessa [25] tutkittiin vesisumun pölynsitomiskykyä eri sumutuspaineilla, kun si-dottavasta pölystä 95,7 % oli hiiltä ja 4,3 % kvartsia. Kokeissa vesisumu kohdistettiin suoraan pölyn emissiolähteeseen. Kokeen järjestelyt ja tulokset löytyvät taulukosta 3.2. Siitä nähdään, että korkeammalla käyttöpaineella muodostetulla sumulla vedenkulutusta voidaan laskea merkittävästi. Toisaalta matalapaineisemman sumun pölynsidontatehokkuus saadaan lähes yhtä suureksi suuremmalla suutinmäärällä ja vedenkulutuksella. Korkeapainesumun pölynsidontatehokkuus oli kuitenkin huomattavasti korkeampi pienille pölyhiukkasille, kuin matalapainesumun. Tutkimuksen yksi keskeinen tulos oli, että varsinkin alle $3 \mu\text{m}$ kokoisien pölyhiukkasten sidonnassa atomisoidulla vesisumulla on tärkeä rooli. Atomisoidusta vesisumusta lisää tietoa löytyy alikappaleesta 3.1.3.

Taulukko 3.2. Kahden eri paineisen vesisumun kuivan pölyn lukumääräpitoisuuden sidontatehokkuus. "Molemmat menetelmät samanaikaisesti" tarkoittaa, että sumutuksessa käytettiin sekä korkea- että matalapainesumua yhtä aikaa [25].

Sumuttimien lukumäärä	Paine (Bar)	Vedenkulutus (l/min)	Saavutettu pölyn-sidontateho (%)
2	172,50	2,8	30,26
20	6,9	18,8	29,89
Molemmat menetelmät samanaikaisesti		21,6	58,50

3.1.2 Tensidien vaikutus vesisumun pölynsidontaan

Vesipisaroiden pölynsidontatehoon voidaan vaikuttaa erilaisilla tensideillä. Esimerkiksi Vapon työmailla ilman turvepölyn sidontaa vesisumulla voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa tehostaa tensidien avulla ainakin imuvaunun tapauksessa, missä pölypäästöjen keskimääräinen hiukkaskoko on usein hyvin pieni verrattuna mekaanisen kokoojavauunun päästöjen keskimääräiseen hiukkaskokoon. Puhtaan veden korkean pintajännityksen 72,6 dyne/cm vuoksi pölynsidontakyky pienille hiukkasille on merkittävästi huonompi, kuin tensideillä käsitellyn veden [44]. Lisäämällä pinta-aktiivista ainetta veteen, sen pintajännitys putoaa alle puoleen [44]. Pintajännityksen pienentyessä hiukkanen tarvitsee pienemmän kineettisen energian upotakseen törmäyksessä vesipisaran sisään [59]. Lisäksi tensidi voi luoda vesipisaran pinnalle kulkeutuneen hydrofobisen hiukkasen pinnalle hydrofiillisen tilan, jolloin hiukkanen imeytyy todennäköisemmin vesipisaraan [59]. Kuvassa 3.2 havainnollistetaan tensidin vaikutusta vesipisaran pölyn sidontaan ilmassa. Pintajännityksen vähentyessä pisaroiden pisarakoko pienenee ja lukumääräpitoisuus ilmassa kasvaa [44]. Pisarakoon pieneneminen ja lukumääräpitoisuuden kasvu eivät kuitenkaan ole itsestään selvyyksiä, vaan muutos liittyy useisiin tekijöihin, kuten sumutussuuttimen tyyppiin, käyttöpaineeseen ja veteen lisätyn tensidin ominaisuuksiin [59].

Isojen hiukkasten pölynsidontatehokkuus ilmasta kasvaa suhteessa hiukkaskokoon, eikä pintajännitystä alentavien kemikaalien lisääminen vesisumuun vaikuta juurikaan pölynsidontatehokkuuteen. Erityisesti pienten hiilipartikkelien pölynsidonnassa $D_p < 2 \mu\text{m}$ tensideillä on merkittävä rooli, kun taas isommat partikkelit sitoutuvat lähes samalla tehokkuudella normaaliin käsittelemättömään vesissumuun kuin tensidillä käsiteltyyn vesisumuun.[57]

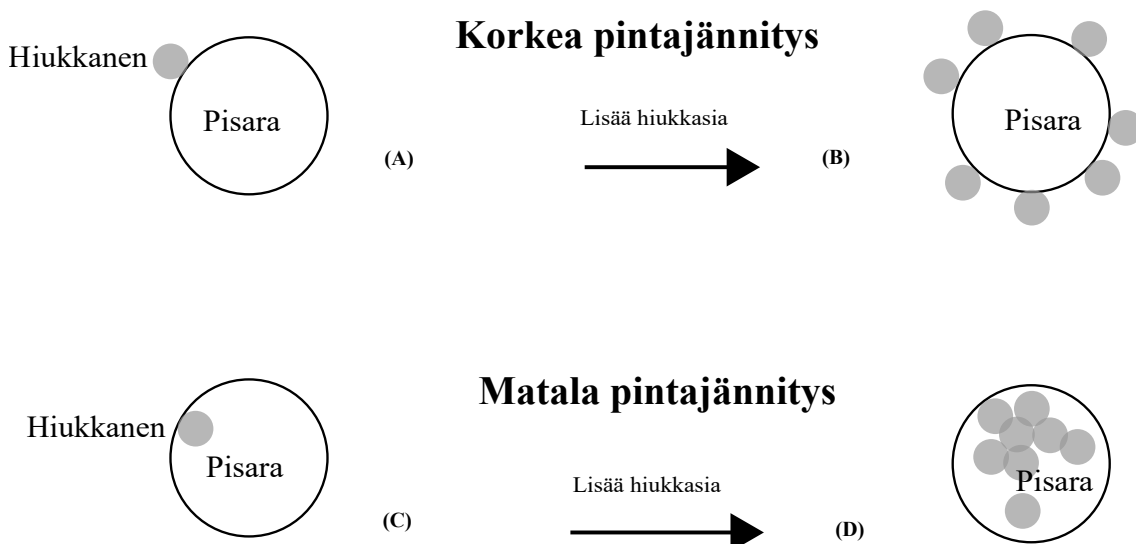
Tensidien lipidit rakentuvat kahdesta osasta: Hydrofiilinen kärki, joka vetää vesimolekyyliä puoleensa ja hydrofobinen häntä, joka hylkii vesimolekyyliä. Tensidejä voidaan tuottaa kolmella eri tavalla perustuen niiden sähkövarausominaisuuteen. Jos hydrofiilisellä päällä ei ole sähkövarausta sitä kutsutaan nonioniseksi tensidiksi. Pään ollessa negatiivisesti varattu tensidiä kutsutaan anioniseksi tensidiksi ja positiivisen pään omaava tensidi on kationinen tensidi. Tensidi voi vaikuttaa pintajännitysominaisuuksien lisäksi myös vesipisaran nettovaraukseen ja sitä kautta sähköisiin ominaisuuksiin riippuen tensidin varauksesta.[59] Yleistettynä nonioniset tensidit tehostavat heikosti varautuneiden hiukkas-

ten sidontaa, kun taas suuren negatiivisen nettovarauksen omaava hiukkaspopulaatio sitoutuu parhaiten kationisella tensidillä käsiteltyihin vesipisaroihin [15]. Anioinisten tensidien toiminta on tapauskohtaisempaa, eikä sen teho ole aina taattu vastakkaismerkkisesti varatulle hiukkaspopulaatiolle [57, 58].

Tutkimuksessa Polat et al. 2002 vain kationisella tensidillä havaittiin merkittävä positiivinen korrelaatio vesipisaran varauksen ja pölynsidontatehokkuuden välillä [46]. Tutkimuksessa käytettiin ulkoisesti melko neutraaleja kaivosteollisuuden aerosoleja: Antrasiitti-, kvartsi-, ja bitumipölyä [46]. Tensidin kationit toivat vesipisaraan suuren positiivisen nettovarauksen ja tehostivat hiukkasten törmäystehokkuutta pisaraan. Anionisilla ja nonionisilla tensideillä vastaavaa vuorovaikutusta ei havaittu, vaan niiden vaikutus perustui lähinnä adheesiovoimiin ja vettymiseen. [46] Tutkimuksessa [57] neutraloimattomat hiiliaerosolit $D_p < 2,1 \mu\text{m}$ sitoutuivat tehokkaasti vesipisaroihin kaikilla tensideillä. Nonionista tensidiä sisältävä vesisumu sitoi joko yhtä tehokkaasti tai huomattavasti tehokkaammin heikosti varautunutta ja negatiivisesti varattua hiilipölyä verrattuna muita tensidejä sisältäviin sumuihin [57]. Tutkimuksessa [59] nonionisilla tensideillä käsitellyllä vesisumulla havaittiin olevan heikosti varatuille, neutraloiduille ja negatiivisesti varatuille koon $D_p < 2,1 \mu\text{m}$ hiiliaerosoleille sama tai parempi pölynsidontatehokkuus kuin muilla tensideillä käsitellyillä vesisumuilla tai puhtaalla vesisumulla. Tutkimuksessa havaittiin, että varsinkin pienikokoisimmat hiukkaset sitoutuivat tehokkaammin vastakkaismerkkisesti varattuun vesisumuun, kuin muihin vesisumuihin. Koska tutkimuksessa varattiin hiukkasiin pienempi pintavaraus kuin esimerkiksi todellisissa hiilikaivoksien olosuhteissa hiilipölyn pintavaraus on, arveltiin, että käytännön olosuhteissa varauksen luovat tensidit voisivat toimia paremmin.[59]

Edellä pohdittiin tendenssien vaikutusta vesisumun pölynsidontaominaisuuksiin lähinnä hiilipölyn ja muiden epäorgaanisten pölyhiukkasten kannalta, koska turvepölyn vesisumutuksesta on erittäin vähän tutkimustietoa. Positiivisesti varattu hiilipöly on kuitenkin hyvä vertailukohde turvepölylle, koska turvehiukkasen pintavaraus on positiivinen ja se on kuivana hydrofobinen yhdiste [21]. Myös hiilihiukkanen on normaaleissa olosuhteissa hydrofobinen[59]. Teoriassa siis pienille kooltaan $D_p < 2,1 \mu\text{m}$ turvepölyhiukkasille vesisumutuksen pölyn sidonnan pitäisi tehostua samoin kuin positiivisesti varatuille hiilipölyn hiukkasille, kun sumutettavaa vettä käsitellään kationisella tensidillä. On vaikeaa ennustaa, miten tensidi vaikuttaa turvehiukkasen imeytymiseen vesipisaran sisälle. Luultavasti pieni turvehiukkanen ei imeydy kovin helposti tensidiä sisältämättömään veteen hydrofobisuutensa takia. Koska turvehiukkanen on negatiivisesti varautunut, positiivisesti varattu kationinen tensidi saattaa parantaa niin hiukkasen imeytymistä vesipisaraan, kuin vesipisaran pölynkeruutehokkuutta ilmassa. Hiilipölylle arvioituja tutkimustuloksia ei voida kuitenkaan suoraan yleistää turvepölylle, koska tensidien vaikutus riippuu hiukkasten varauksesta [59] ja turvehiukkasten negatiivisten varauksien suuruudet saattavat olla hyvin erilaisia kuin kaivosolosuhteiden tai tutkimusten hiilihiukkasten.

Isot turvehiukkaset uppoavat törmätessään vesipinnan läpi pisaraan, niiden suuren liikeenergian vuoksi, tensidin vaikutuksesta riippumatta. Turvepölyn sidonnassa tensidiä oleel-



Kuva 3.2. Tensidi alentaa veden pintajännitystä. Kuvassa A ja B kohdat kuvaavat pienten noin $2\ \mu\text{m}$ kokoisten hiukkasten sitoutumista vesipisaraan, kun vedellä on normaali pintajännitys. C ja D kohdat kuvaavat tilannetta, jossa veden pintajännitystä on laskettu tensideillä.

lisempi rooli on muiden sumutukseen vaikuttavien parametrien valinnalla mutta hyvin valittu tensidi voi vaikuttaa vesisumun pölynsidontatehokkuuteen pienten hiukkasten osalta. Tensidin käyttö ei todennäköisesti ole kuitenkaan kovin vaikuttava tekijä opinnäytetyön pölynhallintalaitteiston optimoinnissa, koska turvenevoilla mitattu pölyhiukkasten kokojakauma on keskimäärin lähteen läheisyydessä hyvin suuri [27]. Kuitenkin esimerkiksi imuvaunujen syklonin poistoilmasta mitattujen turvepölyhiukkasten kokojakauman keskiarvo on suuruudeltaan noin $2\ \mu\text{m}$, joten imuvaunun pölyämisen hallinnassa tensidin käytöllä saattaa olla suurempi rooli [79].

3.1.3 Suuttimen vaikutus vesisumun pölynsidontatehokkuuteen

Yksi oleellisimmista tekijöistä vesisumutuksen tehokkaan pölynkeräyksen saavuttamiseksi on oikeanlaisen suuttimen valinta. Tarkastellaan seuraavaksi tutkimuksen Pollock et al. 2007 [47] pohjalta vesisumun sidontaominaisuuksia suutinvalintojen kannalta sekä oleellisia parametreja, jotka vaikuttavat suuttimen toimintatehokkuuteen. Koejärjestelyissä käytettiin dimensioltaan $2,44\ \text{m}$ kuution muotoista pölykammia. Pöly johdettiin kamioon ennen sumutuksen aloittamista. Sumutusta tehtiin eri paineilla ja suuttimilla, joista tietoa löytyy enemmän taulukosta 3.3. Tutkimuksessa käytettiin myös muita suuttimia, joita ei kuvailtu kovin tarkasti, mutta niitä kuitenkin käytettiin tulosten arvioinnissa. Suuttimien tuottamia pisarakokoja tutkittiin kahdella eri etäisyydellä suuttimesta.[47]

Tässäkin tutkimuksessa huomattiin, että veden paineen lisääminen kasvattaa vesipisarojen alkunopeutta, pitoisuutta ja pienentää pisarakokoa. Mainittiin myös, että aikaisem-

Taulukko 3.3. Tutkimuksessa [47] käytetyt suuttimet ja tutkitut parametrit. Viimeisen sarakkeen etäisyyslukemat tarkoittavat sumutussuuttimen etäisyyttä kohtisuorasta tasosta, johon vesisumu sumutettiin

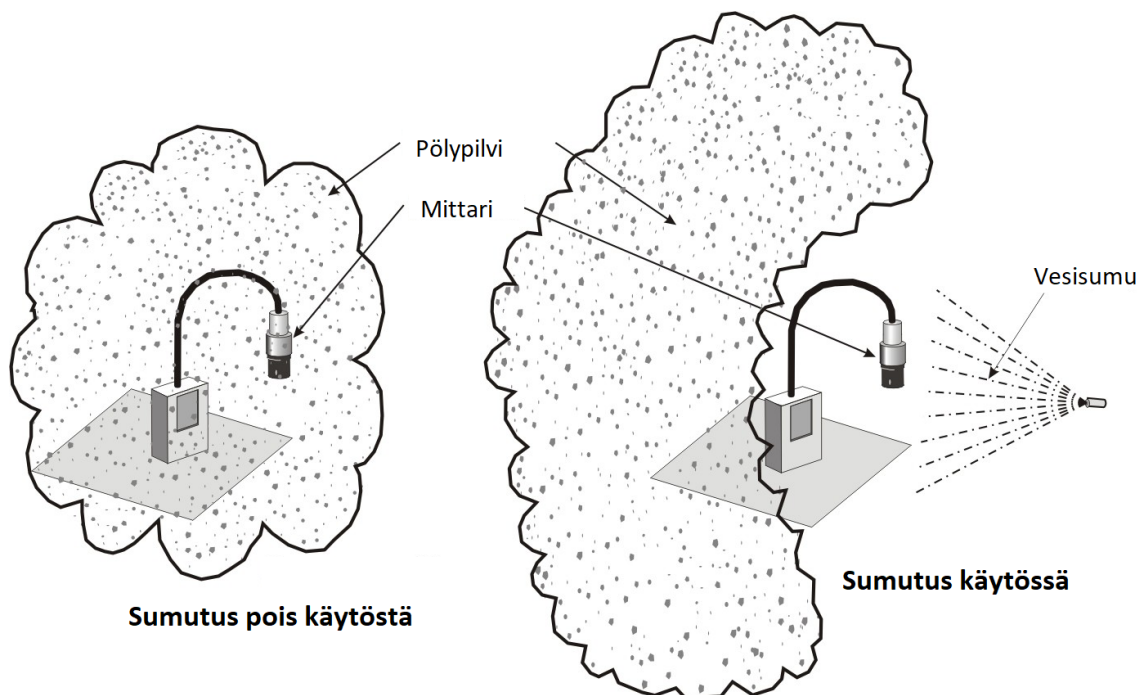
Sumutussuutin	Suuttimen tyyppi	Suoritusominaisuudet	Tutkimuksessa käytetyt parametrit
Spraying Systems UniJet Nozzle No. TTD6-45 81° HC	Yksifluidi ontto kartio	81° Sumutuskulma @ 552 kPa & 3,14 lpm	552 & 1103 kPa @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems UniJet Nozzle No. TTD4-46 33° HC	Yksifluidi ontto kartio	33° Sumutuskulma @ 552 kPa & 2,95 lpm	552 & 1103 kPa @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems FullJet Nozzle No. GG3 GG FC	Yksifluidi täyskartio	59° Sumutuskulma @ 552 kPa & 2,99 lpm	552 & 1103 kPa @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems UniJet Nozzle No. TT2506 25° FF	Yksifluidi litteäsuihku	31° Sumutuskulma @ 552 kPa & 3,22 lpm	552 & 1103 kPa @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems UniJet Nozzle No. TT5006 50° FF	Yksifluidi litteäsuihku	56° Sumutuskulma @ 552 kPa & 3,22 lpm	552 & 1103 kPa @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems Air Atomizing Nozzle No. J-SU22 SU22 Fluid Cap 60100, Air Cap 1401110	Tuplafluidi täyskartio	20° Sumutuskulma @ ilma 345 kPa & 150 lpm, vesi 276 kPa & 1,77 lpm	172 kPa ilma/vesi & 345 kPa ilma/vesi @ 30,48 cm & 60,96 cm
Spraying Systems Air Atomizing Nozzle No. J-SU42 SU42 Fluid Cap100150, Air Cap1891125	Tuplafluidi täyskartio	21° Sumutuskulma @ ilma 303 kPa & 160 lpm, vesi 275 kPa & 1,77 lpm	172 kPa ilma/vesi & 345 kPa ilma/vesi @ 30,48 cm & 60,96 cm

massa tutkimuksessa suuttimien lisääminen ja paineen kohottaminen lisäsivät pölynsi-dontatehokkuutta niin, että pölyä sitoutui vesisumuun enempi käytettyä vesitilavuutta koh-den.[47]

Tutkimuksessa huomattiin, että onttokartiosuuttimella vesipisarat muuttuvat suuremmis-ta pienemmiksi sumutuskuvion reunalta keskelle edetessä samalla pisaroiden nopeuden kasvaessa. Nopeudet olivat 33 ° sumutuskulman onttokartiosuuttimella 1103 kPa veden paineella 30,48 cm päässä suuttimesta keskellä noin 15 m/s ja 5 cm päässä suihkuku-vion keskikohdasta noin 9 m/s. Myös muilla suutintyypeillä pisaroiden nopeus oli keskellä suurempi kuin sivuilla mutta pisarakuvion keskellä esiintyi suhteellisesti isompia pisaroita kuin sivuilla.[47]

Tutkimuksessa tutkittiin myös suuttimien vesisumun ilmanliikutus-ominaisuutta, jossa osa pisaroiden liikemäärästä siirtyy sitä ympäröivälle ilmalle. Tämä luo epätoivottuja ilmavir-

tauksia, jotka voivat aiheuttaa kuvan 3.3 mukaisen ilmavirtauksen vesisumun edessä. Vesisumun ilmanliikutusominaisuus riippui suuttimen sumutuskulmasta ja suutintyyppistä sekä veden paineesta. Korkean vedenpaineen todettiin lisäävän ilmavirtauksia. Suuren suihkutuskulman omaavat suuttimet tuottivat pienempiä vesipisaroita mutta niiden vesipisaroiden vuorovaikutus ilman kanssa oli voimakkaampi. Sumutuskulman 81° omaava tyhjä kartiosuutin generoi pienimmät pisarat pienimmillä pisaranopeuksilla ja liikutti ilmaa tehokkaimmin verrattuna muihin suutintyyppeihin. Vähiten ilmaa liikuttivat pienen sumutuskulman omaavat täyskartio ja ilma-atomisoivat suuttimet sekä litteäsuihkusuutin sumutuskulmalla 25° . [47]



Kuva 3.3. Vesipisarat työntävät edessä olevaa ilmaa ja sen sisältämiä hiukkasia pois vesisumutuksen läheltä heikentäen vesisumun pölynsidontatehoa ja levittäen pölyä. Kuva on muokattu lähteestä [29].

Veden paineen lisääminen lisäsi ilmavirtausta; pienemmät ja nopeammat hiukkaset siirtävät kineettisen energiansa helpommin ilmaan indusoiden suuremman ilmavirran. Suuttimen ilmavirtauksen indusointiominaisuudella ja pölynsidontakyvyllä on käänteinen suhde. Jos vesisuihku sitoo tehokkaasti pölyä sen liike-energiaa ei juuri kulu ilmanvirran luomiseen ja käänteisesti, jos energiaa kuluu paljon ilmavirtauksen indusoimiseen, pölynsidontateho heikkenee. Ilmavirtausta indusoiva sumu sitoo pölyä heikosti kahdesta syystä: ilmavirta työntää sidottavia hiukkasia kauemmas, eikä vesisumu pysty sitomaan niitä. Toisaalta, koska suuri osa sumun liike-energiasta kuluu vuorovaikutukseen ilman kanssa, sen kineettinen energia laskee, jolloin vesipisaran hiukkasten sitominen törmäyksen kautta vähenee. [47]

Pelkästään ilmassa leijuvien hiukkasten sitomistehoa tarkastellen yleistäen seuraavat suuttimet ovat tehokkaimpia suositelluimmasta vähiten suositeltuun: 1) ilma-atomisoiva suutin 2) onttokartiosuutin 3) litteäsuihkusuutin 4) täyskartiosuutin [73].

Taulukko 3.4. Yleisiä vesisumusuuttimia ja niiden käyttökohteita kaivosteollisuudessa lähteestä [54].

Suuttimen tyyppi	Pisaran koko	Pisarakoko (μm)	Yleinen käyttötarkoitus
Hydraulinen onttokartio	Pieni	145 – 225 [14]	Käytetään alueilla, joilla pöly on levinnyt laajalle
Hydraulinen litteäsuihku	Pieni tai keskikokoinen	145 – 325 [14]	Käytetään ahtaissa suljetuissa tiloissa
Hydraulinen täyskartio	Keskikokoinen tai suuri	226 – 400 [14]	Käytetään paikoissa, joissa suuttimet on asetettava kauas pölynlähteestä
Ilma-atomisoiva	Erittäin pieni	Alle 145 [14]	Käytetään suljetuissa tiloissa minimoimaan pölyn virtausta
Hydraulinen hienosumu	Erittäin pieni	Alle 145 [14]	Käytetään suljetuissa tiloissa minimoimaan pölyn virtausta sekä hienojakoisen sumun muodostamiseen

Taulukossa 3.4 esitetään eri suutintyyppejä ja niiden ominaisuuksia. Ilma-atomisoitu vesisumu ei sovi moniin käytännön sovelluksiin pienen tehollisen vaikutusetaisyytensä, kalteutensa, monimutkaisen teknologiansa ja helpon tukkeutumisen vuoksi. Siksi kaivosteollisuuden sovelluksissa yleensä paras ratkaisu on lähes yhtä tehokas onttokartiosuutin, joka ei suuremman suuaukkonsa ansiosta tukkeudu yhtä helposti.

Litteät suihkusuuttimet soveltuvat parhaiten paikkoihin, joissa sumutetaan vesipisaroita kapeaan tilaan. Tällöin vettä ei sumutu alueelle, jossa pölynsidontaa ei tarvita. Se on myös vedenkulutukseltaan taloudellinen ratkaisu. Täyskartiosuutin taas soveltuu paikkoihin, joissa suuren liike-energian omaavia pisaroita pitää suihkuttaa kauas kohteesta, eikä suutinta saada pölynlähteen välittömään läheisyyteen. [29] Ilma-atomisoivien suuttimien lisäksi pienhiukkaspölynsidontaan on kehitetty hydraulisia pienisumusuuttimia, jotka tuottavat pieniä vesipisaroita kuten ilma-atomisoivat suuttimetkin. Erona on, että niiden pisaran muodostus toimii täysin veden paineella ja ne tuottavat samanlaisen pisarakuvion kuin ontto- tai täyskartiosuutin, kun taas ilma-atomisoivalla suuttimella muodostetaan paljon erilaisia kuvioita.[54]

Spraying systems co. yhtiön vesisumutuksen suutinoppaasta A Guide to Spray Technology for Dust Control [54] löytyy hyvä käytännön sääntö pisarakoon ja suuttimen valintaan eri pölyntorjuntatilanteissa. Pölyämisen ennaltaehkäisyssä, käytetään yleensä standardeitua hydraulisia suuttimia, jotka tuottavat 200 – 1200 μm kokoisia pisaroita. Ilmassa leijuvan pölyn torjunnassa taas käytetään yleensä joko ilma-atomisoivia suuttimia tai hydraulisia hienosumusuuttimia, jotka tuottavat 20 – 200 μm kokoisia pisaroita.[54] Pienet

pisarat soveltuvat vain systeemeihin, joissa sumutusetäisyys on lyhyt ja keräysaika pieni, koska niiden pysähtymismatka on lyhyt ja ne haihtuvat nopeasti ilmasta [14]. Suutinvalinta tarkentuu kuitenkin kulloisessakin tilanteessa pölyn oletetun kokojakauman ja käyttöympäristön mukaan. Opinnäytetyössä käytetään litteäsumusuuttimia, joiden pisarakoot ovat todennäköisesti noin 150 – 300 μm käyttöpainesta ja suutinmallista riippuen [9].

3.2 Vesisumun pisaroiden elinaika ja vaikutus kosteuteen

Opinnäytetyön pölynhallintajärjestelmää tutkittaessa ja siihen muutoksia tehtäessä voi olla tarpeellista tietää vesisumun vaikutuksesta ympäristöön ja toisaalta myös ympäristön vaikutuksesta vesisumuun. Esimerkiksi, jos halutaan vaikuttaa mitattavan aerosolin vesipitoisuuteen, on tarpeellista tietää mitattavan ilman suhteellinen kosteus ja vesipisaroiden kokojakauma. Tietoa tarvitaan mm. mittauslaitetta valittaessa, koska useat aerosolien mittauslaitteet toimivat epätarkasti tai menettävät toimintakykynsä mitattavan ilman kosteusprosentin ollessa korkea. Toisaalta, jos halutaan vaihtaa vesisumutuksen pisarakokoa, on hyvä tietää eri pisarakokojen elinaika ilmassa ja suhteellisen kosteuden vaikutuksesta siihen.

3.2.1 Vesisumutuksen vaikutus ilman kosteuteen

Tämä alikappale on kirjoitettu Vaisalan raportin Humidity conversion formulas, calculation formulas for humidity [62] ja kirjan W. C. Hinds. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles [17] avulla. Kun korkeapainesumua suihkutetaan ilmaan, sen suhteellinen ja absoluuttinen kosteus muuttuvat. Vallitsevan ilmankosteuden arvioiminen etukäteen on mittauksen kannalta tärkeää, jos ilmassa leijuvia vesipisaroita pyritään poistamaan mitattavasta aerosolista tehokkaasti niiden kulkeutuessa mittalaitteelle. Ilmankosteuden määrittämisestä voi olla myös apua arvioitaessa kosteuden aiheuttamaa vastetta mittalaitteella, jos vettä jää mitattavaan aerosoliin.

Ilman suhteellisen kosteuden määrittämisessä käytetään vesihöyryn osapainetta ilmassa sekä sen saturaatiopainetta. Saturaatiohöyrynpaine on riippuvainen lämpötilasta. Vedelle se lasketaan seuraavasti:

$$p_s = \exp\left(16,7 - \frac{4060}{T - 37}\right) \text{ kPa} \quad (3.4)$$

jossa T on lämpötila Kelvineinä. Kaava 3.4 antaa tuloksia julkaistuun dataan nähden 0,5%:n tarkkuudella lämpötilan ollessa 273 – 373 K, eli 0 – 100 °C. [17]

Saturaatiosuhde S_R tarkoittaa veden höyrynpaineen ja saturaatiohöyrynpaineen suhdetta, eli

$$S_R = \frac{p_\infty}{p_s} \quad (3.5)$$

Saturaatiosuhteen ollessa alle yhden, eli vesihöyryn osapaine on pienempää kuin satu-

raatiohöyrynpaine, höyry on alisaturoitunutta. Tällöin systeemissä vesihöyryä muodostuu enemmän ympäröivään ilmaan kuin sitä tiivistyy takaisin vedeksi. Kun saturaatiosuhde on tasan yksi, höyry on saturoitunutta, jolloin tiivistymistä ja höyrystymisen ovat systeemissä tasapainossa. Saturaatiosuhde voi olla myöskin enemmän kuin yksi, jolloin höyry on supersaturoitunutta. Tällöin vesihöyrystä tiivistyy vettä enemmän kuin vedestä muodostuu vesihöyryä.[17] Suhteellinen kosteus kirjoitetaan kaavan 3.5 avulla seuraavasti:

$$RH = S_R \times 100\%, \quad (3.6)$$

eli suhteellinen kosteus RH on saturaatiosuhde prosentteina. Absoluuttinen kosteus taas on vesihöyryn massa m_v yksikkötilavuutta V kohden ilmassa [62]. Sille voidaan kirjoittaa seuraavanlainen kaava:

$$AH = \frac{m_v}{V}. \quad (3.7)$$

Jos tehdään karkea approksimaatio ja arvioidaan vesihöyryä ideaalikaasuna, ideaalikaasujen yhtälöistä saadaan yhteys veden höyrynpaineelle ja absoluuttiselle kosteudelle:

$$\frac{m_v}{V} = \frac{p_\infty}{R_v T}, \quad (3.8)$$

jossa $R_v = 461,5 \text{ J/kgK}$. R_v on vesihöyrylle ominainen kaasuvakio, jota käytetään useassa kirjallisuusuhteessa, kun arvioidaan vesihöyryä ideaalikaasuna [62, 69, 71]. Opinnäytetyön mittauksen oletetuissa olosuhteissa ja vedenkulutuksella tämä arvio on tarpeeksi tarkka ja sen aiheuttama virhe suhteessa tarkkaan tulokseen on Hyperphysics.com verkkosivujen [20] mukaan 2 – 15 %. Virheen suuruus ei haittaa, koska halutaan vain selvittää karkea kuva vesisumun vaikutuksesta absoluuttiseen kosteuteen ja suhteelliseen kosteuteen sumutuksen aikana. Oletetut olosuhteet tässä tapauksessa ovat: lämpötila 283 – 300 K, ilman suhteellinen kosteus ennen sumutusta 0 – 95 % ja vedenkulutus sumutuksessa 1 – 30 l/min.

Edellä esitetyillä kaavoilla voidaan arvioida esimerkiksi opinnäytetyön mittauksien ilman kosteutta sumutuksen aikana, kun tiedetään vallitseva ilmankosteus ulkoilman lämpötilassa ja korkeapainevesipumpun sumuttaman veden määrä ja leviäminen ilmaan. Veden määrä riippuu suuttimien määrästä. Yksi litteäsumusuutin, josta kerrotaan alikappaleessa 3.3.1, sumuttaa ilmaan tietyn määrän vettä riippuen suutinmallista ja käyttöpaineesta. Vesi leviää lähes välittömästi riippuen suuttimien positiosta ja käyttöpaineesta noin 2 metriä korkealle ja 3 metriä leveälle alueelle. Keruunopeus on yleensä noin 1 m/s. Traktori nopeus vaikuttaa myös vesisumun leviämiseen. Tutkimuksessa [72] esitetään emissio-kertoimen laskemiseksi alikappaleesta 2.5.5 löytyvää kaavaa 2.1. Siinä horisontaalinen pölypilven leviäminen oletetaan merkityksettömäksi, kun mittaus tapahtuu lyhyessä ajassa pölypäästön muodostumisen jälkeen. Siinä arvioidaan myös pölyhiukkasten vertikaalisen leviämisen tapahtuvan lähes välittömästi ilman turbulenssista riippuen. Oletetaan, että vesipisarot ovat keskimäärin niin raskaita, etteivät ne juurikaan nouse ilmassa korkeussuunnassa vaan pysyvät sumutuksen jälkeen sumutuskorkeudessa tai laskeutuvat alemmas. Kirjoitetaan korkeapainesumun keruun aikainen keskimääräinen absoluuttisen

kosteuden lisäys ilmaan mukaillen kaavaa 2.1:

$$\Delta AH = \frac{\rho_v v_{tk} n Q}{Z_0 X_0 v}, \quad (3.9)$$

jossa ρ_v on veden tiheys kg/m^3 , n on suuttimien määrä, Q on yhden suuttimen tilavuusvirta m^3/s , Z_0 on vesisumupilven korkeus, X_0 on vesisumupilven leveys ja v_{tk} on traktorin ajonopeus m/s .

Kaavojen 3.4, 3.5, 3.7, 3.8 ja 3.9 avulla voidaan laskea karkea arvio opinnäytetyön vesisumutuksen aiheuttamalle ilmankosteudelle. Tehdään seuraavaksi kaavojen avulla tarvittavat laskutoimitukset, joissa veden määrää ja ympäristön suhteellista kosteutta ja lämpötilaa muunnellaan pienistä arvoista korkeisiin arvoihin. Laskutoimituksia ei tässä yhteydessä esitetä, koska ne ovat hyvin yksinkertaisia ja tarkkojen lukuarvojen sijaan halutaan selvittää vain itse ilmiön suuruusluokkaa. Laskutoimituksista huomataan, että sumutuksen aikaiseksi laskennalliseksi suhteelliseksi kosteudeksi ilman vesisumupilvessä saadaan ratkaisuja normaaleista ulkoilman kosteuksista aina selkeästi kastepisteen suhteellisen kosteuden moninkertaisesti ylittäviin arvoihin, eli kosteus voi vaihdella hyvin paljon riippuen ympäristöstä ja sumutettavan veden määrästä.

Ilmankosteus vaihtelee myös sumupilven rajaaman tilavuuden sisäpuolella, eli edellinen laskennallinen arvio on mielekäs vain keskimääräiselle suhteelliselle kosteudelle sumupilven rajaamassa tilavuudessa välittömästi sumutuksen jälkeen. Voidaan todeta, että vesisumun poistaminen mittaustilasta tarkan pölypilven mittaustuloksen saavuttamiseksi voi olla hyvin työlästä ilman suuren absoluuttisen kosteuden vaihtelun vuoksi. Vaikka vesisumu onnistuttaisiinkin jollain tekniikalla poistamaan lähes kokonaan mitattavasta näytteestä, saattaisi ratkaisu aiheuttaa myös häviöitä mitattavassa pölynäytteessä. Tämän vuoksi vesisumua ei opinnäytetyön pölymittauksissa poisteta mittaustuloksesta vaan sen vaikutus mittaustuloksiin otetaan huomioon mittausten jälkeen alikappaleessa 4.4.6 kerrotulla tavalla.

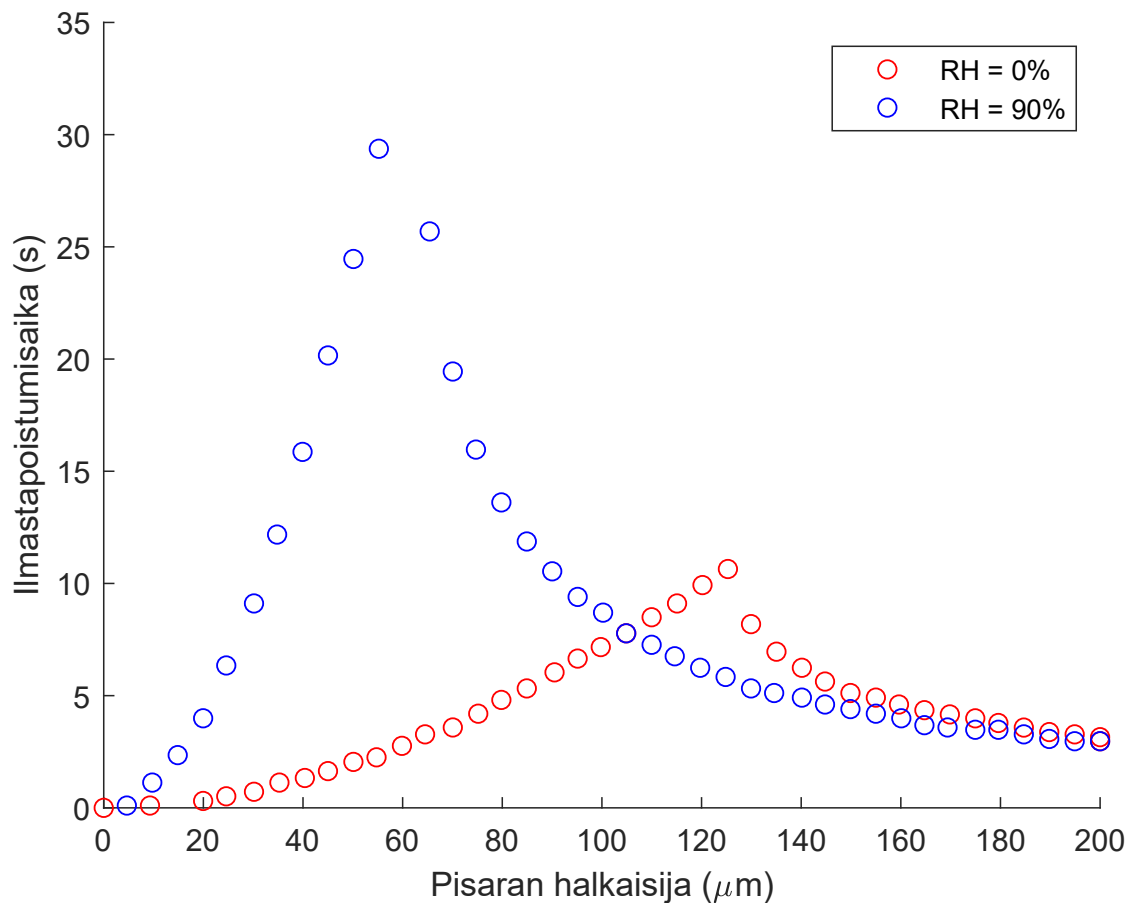
3.2.2 Vesipisaran elinaika ilmassa

Vesipisaran elinaika ilmassa riippuu ympäristöstä, kuten suhteellisesta kosteudesta, lämpötilasta ja tuulesta sekä pisarakoosta. Pienille vesipisaroille haihtuminen on nopeampaa kuin gravitaation vuoksi tapahtuva maahan laskeutuminen ja isot pisarat käänteisesti laskeutuvat nopeampaa maahan, kuin haihtuvat ilmassa. Tässä alikappaleessa esitellään tietoa vesipisaran eliniästä ilmassa, jonka pohjalta voidaan arvioida vesipisaroiden elinikää pölynhallintajärjestelmissä.

Oheiseen kuvaan 3.4 on piirretty eri kokoisten pisaroiden ilmastapoistumisaikoja suhteellisissa kosteuksissa $RH = 90\%$ ja $RH = 0\%$, kun pisara vapautuu ilmaan kahden metrin korkeudella maan pinnasta. Paikallaan pysyvässä ilmassa vesipisaralle tietyissä olosuhteissa voidaan laskennallisesti määrittää tietty koko, jossa pisaran haihtuminen ja laskeu-

tuminen tapahtuvat yhtä nopeasti. Kuvassa 3.4 tämä koko on noin $60\ \mu\text{m}$, kun $RH = 90\%$ ja noin $125\ \mu\text{m}$, kun $RH = 0\%$. [76]

Kuvasta havaitaan myös, että suhteellisen kosteuden alentaminen vähentää pienien vesipisarakokojen elinaikaa ilmassa ja siirtää elinajan maksimia suurempiin pisaroihin. Tämä johtuu siitä, että kuivissa olosuhteissa pienet pisarat haihtuvat huomattavasti nopeammin kuin kosteassa ilmassa. Suuren vesipisaran (n. $120\ \mu\text{m}$) elinikä on kuivassa ilmassa pidempi kuin kosteassa. Tämä johtuu siitä, että kosteassa ilmassa vesi ei haihdu nopeasti pisaran pinnalta, jolloin pisaran massa pysyy suurena ja se putoaa nopeammin maahan, kun taas kuivalla ilmalla pisaran päältä haihtuu vettä nopeammin, jolloin se kevenee putoamismatkallaan ja putoamisaika kasvaa. Vesipisaran elinikä pisarakoon ollessa $200\ \mu\text{m}$ on noin 2,5 s. Vesisumutuksessa sumupilvessä suhteellinen kosteus nousee monesti yli 100:n, kuten alikappaleessa 3.2.1 huomattiin.



Kuva 3.4. *Pisaroiden ilmastapoistumisaika pisarakoon funktiona. Pisarakoolla tarkoitetaan pisaran alkukokoa. Kuva on piirretty tutkimuksessa [76] julkaistun datan pohjalta.*

Kuvaajasta 3.4 voidaan suuntaa-antavasti arvioida eri vesipisarakokojen elinikää ilmassa eri ilmankosteuksilla. Vesisumutuksessa sumupilven keskiössä suhteelliset kosteudet ovat yli 100 %. Tällöin todennäköisesti suuret pisarat putoavat kuvassa 3.4 esitetyjä arvoja nopeammin tai samalla nopeudella. Pienet pisarat taas saattavat pysyä ilmassa kauemmin kuin kuvassa, koska haihtuminen vähenee. Toisaalta pienten pisaroiden massa saattaa supersaturaation aiheuttaman tiivistymisen ja pisaroiden keskinäisten törmäys-

ten vuoksi kasvaa, mikä pienentäisi pienten pisaroiden elinikää kosteassa ilmassa. On myös huomioitava, että sumutuksen levitessä ympäristöön, suhteellinen kosteus voi vähentyä nopeasti, jos ilma on kuivaa. Esimerkiksi alikappaleessa 3.2.1 vesisumutuksen vaikutuksen alaisen ilman suhteelliseksi kosteuden laskettiin olevan selvästi alle kastepisteen, jos ilman suhteellinen kosteus ennen sumutusta oli 0 %:a, vedenkulutus sumutuksessa alhaista ja vesi leviää tarpeeksi laajaan tilavuuteen.

3.3 Vedenkulutusmittauksissa käytetyn pölynhallintajärjestelmän esittely

Pölynhallintajärjestelmän pääkomponentti on painevesipumppu, joka voidaan asentaa joko keruuvaunuun tai traktorin hydraulikkaan. Painevesipumppu on yhdistetty letkuin sumutuselementteihin, joissa on kolme sumutussuutinta elementtiä kohden. Sumutussuuttimet on kohdistettu niin, että ne sumuttavat vettä kohtiin, joihin suurimpien pölypäästöjen hiukkaspilvien oletetaan sijaitsevan. Tässä kappaleessa kerrotaan lisää opinnäytetyön keruuvaunujen pölynhallintajärjestelmän toiminnasta ja sen eri osista.

Turvepölyä keruuvaiheessa pyritään hallitsemaan korkeapainevesipumpun tuottamalla vesisumulla. Mekaanisessa kokoojavaunussa ja imuvaunussa pölynhallinta toteutetaan hieman eri tavoin. Koska opinnäytetyön aihe ja mittaukset painottuvat enemmän mekaaniseen kokoojavaunuun, esitellään alikappaleissa 3.3.1 ja 3.3.2 pölynhallintajärjestelmää ainoastaan mekaanisessa kokoojavaunussa. Alikappaleessa 3.3.3 taas kommentoidaan tutkimukseen perustuen Vapon tämän hetkistä pölynhallintajärjestelmän asennustapaa imukokoojavaunussa. Imukokoojavaunun pölynhallinnasta ei tässä opinnäytetyössä tehty mittauksia, joten sen toimintaan ei perehdytä kovin tarkasti.

3.3.1 Korkeapainepumppu HPW 200 ja sumutussuuttimet mekaanisessa kokoojavaunussa

Pölynhallintajärjestelmässä vettä pumppaa sekä mekaanisen kokoojavaunun että imukokoojavaunun tapauksessa korkeapainepumppu HPW 200. Perehdytään tässä alikappaleessa pumpun toimintaan ja sen oheislaitteisiin mekaanisen kokoojavaunun tapauksessa sekä pumppuun liitettyihin sumutussuuttimiin, joilla luodaan vesisumupilvi pölynhallintaa varten. Mekaanisen kokoojavaunun malli on JMK – 55V. Mekaanisen kokoojavaunun etuosassa on palovesisäiliö, josta hydraulinen painepumppu pumppaa vettä. Kuvassa 3.5 näkyvät palovesisäiliöön liitetyt suodatin ja painevesipumppu sekä venttiili, jolla pumppu yhdistettiin traktorin hydraulikkaan. Painepumppu on Dynaset HPW200 ja sen maksimivirtaus vedelle on 30 l/min ja öljylle 45 l/min. Vesisäiliön ulkomitat ovat 120x90x66 cm, jolloin sen ulkomitoista laskettu tilavuus on noin 713 litraa. Säiliön metalliseinämän paksuus on 1,5 cm, joten säiliöön mahtuu vettä noin 641 litraa. Paineumpun imuletku on palove-



Kuva 3.5. Pölynhallintajärjestelmän suodatin, hydraulikkaventtiili ja painepumppu asennettuna mekaaniseen kokoojavaunuun JMK-55V. Vasemmassa yläkulmassa on suodatin ja alhaalla ovat painepumppu ja venttiili, jota säädetään kuvassa näkyvällä vivulla. Painepumppu on yhdistetty venttiilillä traktorin hydraulikkaan. Hanan sisältävän letkun ja suodattimen kautta vesisäiliöön pumppu taas pumppaa vesisäiliöstä vettä. Pumppu pumppaa veden sumutuselementeille, jotka esitellään alikappaleessa 3.3.2.

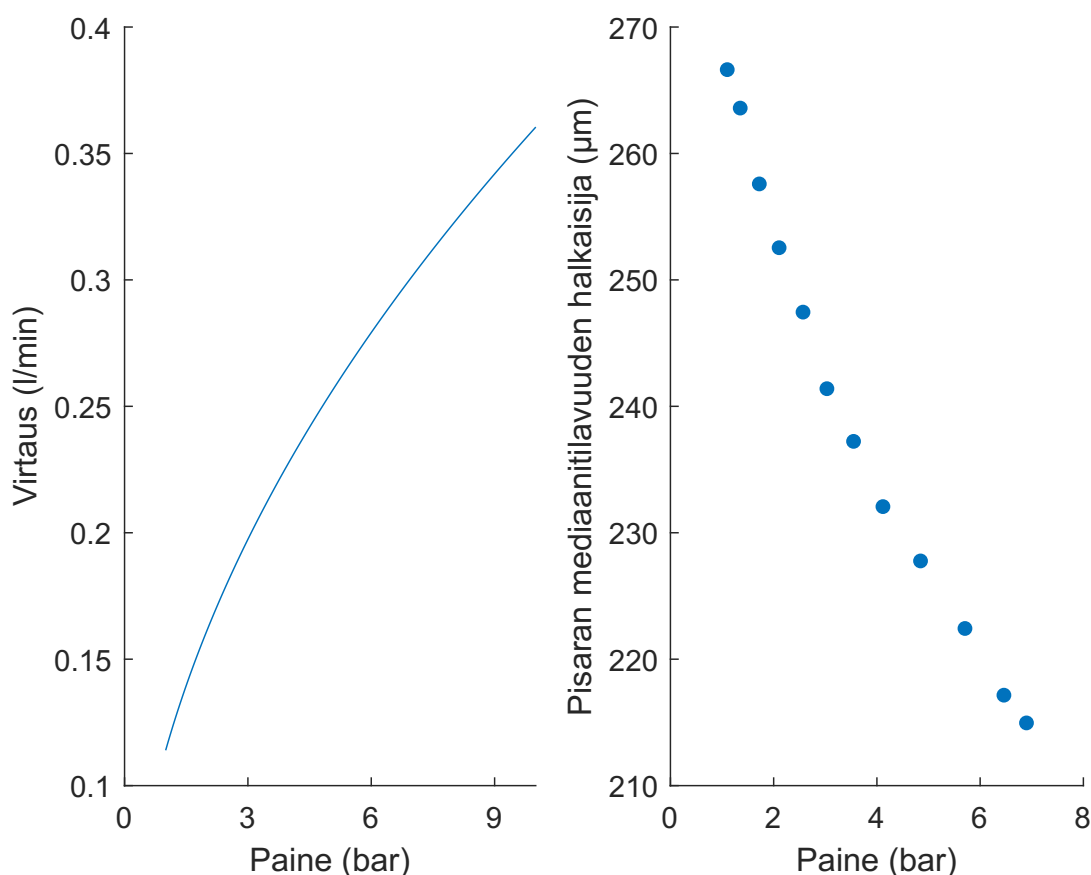
sisäiliön mekaanisen kokoojavaunun seinän puolella pohjan lähes korkeudella. Paloturvallisuussyistä palovesisäiliötä ei ole mahdollista pumpata tyhjäksi, vaan sen sisälle on asennettu noin 30 cm korkea väliseinä, joka estää palovettä valumasta pumpun letkulle. Koska väliseinä on keskellä säiliön pohjaa, palovedeksi on varattu noin 153 litraa säiliön vedestä. Tällöin vesisumutukseen on käytettävissä vettä yhteensä noin 488 litraa. Vesi kulkee pumpulle letkussa, johon on asennettu väliin suodatin suodattamaan epäpuhtauksia. Suodattimen MESH-luku on 80. Ohjekirjan mukaan pumpun vetenä voidaan käyttää runsaasti kiintoainetta sisältävää vettä, mutta se lyhentää pumpun käyttöikää huomattavasti. Suodatin ei tähän mennessä tehtyjen kokeiluiden pohjalta sovellu turvevesialtaiden veden suodattamiseen.

Pumppu saa käyttövoimansa traktorin hydraulikasta. Hydraulikkaletkut on asennettu traktorista kolmitieventtiiliin, joka välittää hydraulikkaöljyn korkeapainepumpulle. Hydraulikan sallittu maksimipaine pumpussa on 200 bar. Veden paine on säädeltävissä.

Pumppu pumppaa veden letkua pitkin elementeille, joihin kuhunkin on asennettu kolme suutinta. Suuttimista löytyy lisää tietoa alikappaleesta 3.3.1. Elementteihin tuleva paineis-

tettu vesi purkautuu suuttimista ulos vesisumuna. Suutintyyppejä voi myös vaihtaa, mutta kyseiseen Dynaset-pakettiin valmistajalla ei ollut saatavilla pienempää pisarakokoa tuotavia suuttimia ainakaan opinnäytetyön kirjoitushetkellä 7/2018. Elementtien paikkaa ja kiertokulmaa voidaan muuttaa, jolloin venttiilien vesisumutus voidaan suunnata eri tavoin ja vesisumutus voidaan tehdä eri paikoista. Elementistä saa myös manuaalisesti katkaisua veden virtauksen vivusta, eli sumuttavien elementtien määrää voidaan muunnella.

Opinnäytetyön pölynhallintajärjestelmän veden sumutukseen on valittu litteäsumusuutinmallit H1/4VV-950050 ja H1/4VV-6502. Mallin koodissa H-VV tarkoittaa suutintyyppiä ja 1/4 tarkoittaa suuttimen tuloaukon halkaisijaa tuumissa. Halkaisija on millimetreihin muunnettuna 6,35 mm. Suuttimien koodeissa luvut 95 ja 65 tarkoittavat suuttimien sumutuskulmia 40 psig, eli noin 2,8 bar käyttöpaineella. Luvut 0050 ja 02 taas tarkoittavat veden virtausta 0,05 ja 0,2 gallonia/min, eli 0,19 l/min ja 0,76 l/min käyttöpaineen ollessa edellä mainittu. Kuvaan 3.6 on piirretty 950050 suuttimen veden virtaus paineen funktiona. Koska suuttimen koodiin ei ole merkitty erikseen materiaalia, on suuttimen materiaali oletuksena messinkiä. Suuttimien suositellut käyttöpaineet ovat 0,7 – 35 bar.[9]



Kuva 3.6. Vasemmalla H1/4VV-950050 suuttimen teoreettinen veden virtaus eri käyttöpaineilla sekä oikealla H1/4VV-800050 suuttimen pisarakoko eri käyttöpaineilla. Näiden kahden suutinmallin pisarakoot ovat todennäköisesti hyvin samanlaiset. Kuva on piirretty lähteen [9] tietojen perusteella.

Suuttimien vedenkulutus ja sumutuskulmat eivät ole vakioita, vaan ne ovat verrannollisia

paineeseen. Esimerkiksi suuttimen H1/4VV-950050 sumutuskulmat 1,4 ja 5,5 bar käyttö-paineilla ovat 81 ° ja 105 °. Kahden käyttöpaineen P_1 , P_2 ja niiden aiheuttamien virtauksien Q_1 , Q_2 välille voidaan muodostaa seuraavanlainen verranto:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \sim \frac{P_1^N}{P_2^N}, \quad (3.10)$$

jossa N on virtauseksponentti, joka on litteäsumusuuttimelle arvoltaan 0,5 [22].

Myöskin suuttimen pisarakoko muuttuu paineen funktiona. Valmistajan suutinesitteessä ei ollut tarkkaa tietoa pisarako'ista [22]. Tarkempaa pisarakoko-dataa internetistä löy-tyy saman valmistajan litteäsumusuuttimelle H1/4VV-800050. Tämä suutin omaa saman vedenkulutuksen ja lähes saman sumutuskulman kuin opinnäytetyön suutin, joten sen pisarakokodata kuva todennäköisesti hyvin H1/4VV-900050-suuttimen pisarakokoja [9]. Kuvaan 3.6 on piirretty 800050 suuttimen keskimäärisiä pisarakokoja paineen funktiona.

3.3.2 Veden sumutuksen toteutus mekaanisessa kokoojavaunussa

Sumutussuuttimien paikat ja suunnat pyrittiin asentamaan niin, että niiden aiheuttama pö-lynsidonta on mahdollisimman tehokasta. Asennuksissa otettiin huomioon myös tiettyjä käytännön seikkoja, jotka rajoittivat mahdollisia sumutussuuttimien paikkoja. Vesisumu ei esimerkiksi saanut kastella kerättävää turvetta.

Sumuttavien suuttimien paikan valinta suhteessa pölypilveen on tärkeää, koska pölynsi-donta ei ole tehokasta, ellei vesipisara kohtaa tulevaa pölypitoisuutta tarpeeksi suurel-la nopeuserolla. Tämän vuoksi vesisumu tulisi sumuttaa suoraan pölypilven konsentroi-duimpiin kohtiin.

Mekaanisella kokoojavaunulla konsentroituneimpien kohtien arvioiminen vaunun ympä-ristössä on vaikeaa, koska pölypilven paikka vaihtelee esim. tuulennopeuden ilmakehän stabiiliuden ja vaunun täyttöasteen mukaan. Vapo Oy:n työmailta kuvattujen videoiden perusteella runsain pölypilvi muodostui kuitenkin yleensä vaunun taakse noin kahden metrin korkeuteen kuljetushihnan ja takaseinän väliseen kulmaan ja kuljetushihnan ala-päähän noin metrin korkeuteen. Suuttimet on asennettu, niin että ne sumuttavat eri suun-nista näille alueille, mutta eivät kuitenkaan suoraan pölyn lähteisiin.

Kuvassa 3.7 esitellään numeroin suutinelementtien mahdolliset paikat mekaanisessa ko-kojavaunussa. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä suutinelementit oli asennettu kohtiin 4, 9 ja 10. Kohtaan 4 asennetussa suutinelementissä kaikki kolme suutinta olivat mallia H1/4VV-950050 ja muissa elementeissä oikean- ja vasemmanpuoleinen suutin olivat tätä mallia, kun taas keskimäinen suutin oli mallia H1/4VV-6502. Lisää tietoa näistä suutti-mista löytyy alikappaleesta 3.3.1.

Vapo Oy:n työmailloilla kuvatuista videoista on havaittu, että pölyä emittoituu paljon kuvan



Kuva 3.7. Kuvaan on merkitty numeroilla paikat, joihin suutinelementit voi asentaa. Kuvasta näkyy vain nostohihnan takaa katsottuna oikea puoli. Suuttimet voidaan asentaa toiselle puolelle nostohihnaa samoin.

3.7 kohdan 1. alapuoleisesta raosta. Muutenkin pölyä tulee paljon vaunun yläosasta tiivistämättömistä raoista. Lisäksi pölyämistä tapahtuu runsaasti mekaanisen kokoojavauunun hihnalta, eli kohdista 9 ja 10 sekä kohdan 7 alla sijaitsevasta hihnan osasta, joka on kosketuksessa turvekenttään keruun aikana. Sumutussuuttimia ei asennettu sumuttamaan suoraan pölyämiskohtiin, koska niitä on runsaasti ja tietyissä tapauksissa sumu voi kastella kerättävää turvetta.

Pölyämisen vähentämiseksi kuljetinhihnan päälle asennettiin kevytpeite. Kevytpeitteellä ei voitu peittää kuljettimen kaikkia mahdollisia pölyämispaikkoja täysin, koska kevytpeitteen alle muodostuu kuljettimessa ylipaine. Kevytpeitettä levitettiin metallitangoilla myös yli kuljettimen. Suurin osa kevytpeitteen peittämän sumutuselementin vesisumusta sinkoutui ilmassa muutaman metrin ja törmää kevytpeitteeseen. Jos emittoitunut turvepöly leijui kevytpeitteen rajaamassa tilassa, sen sitoutuminen vesisumuun tehostui kevytpeitteen vuoksi.

3.3.3 Veden sumutuksen toteutus imukokoojavaunussa

Tässä opinnäytetyössä Vapo Oy:n pölynhallintajärjestelmän toimintaa ei testattu imukokoojavaunussa, kuten mekaanisen kokoojavaunun tapauksessa tehtiin. tehdään kuitenkin lyhyt katsaus vesisumutuksen toimintaan imuvaunussa. Imukokoojavaunu toimii samalla korkeapainevesipumpulla kuin edellä esitelty mekaaninen kokoojavaunukin. Erona imuvaunun veden sumutuksessa on, että vettä ei suihkuteta ulkoilmaan vaan imuvaunun pölynerotussykloneiden poistoilmaputkeen, jolloin suurin osa vesisumusta sinkoutuu syklonin kovan virtausnopeuden vuoksi syklonin poistoilmaputkesta takaisinpäin ulkoilmaan. Pieni osa vedestä päätyy sykloniin. Imukokoojavaunun vesisäiliönä käytetään 1000 litraista IBC-säiliötä.

Opinnäytetyön aihe painottuu käytännön mittausten osalta vain mekaanisen kokoojavaunun vesisumun tehokkuuden optimointiin. Otetaan kuitenkin lyhyt katsaus imukokoojavaunun vesisumutukseen ja pohditaan siihen parannusmahdollisuuksia. Imuvaunun tapauksessa vesisumutus on asennettu metallivanteilla sykloneiden päälle ja sumutus osoittaa vastavirtaan nähden syklonin poistoilmaan. Sumutussuuttimet ovat samoja kuin edellä esitellyssä mekaanisessa kokoojavaunussakin. Hyvää tässä asetelmassa on, että syklonin puhaltaessa poistoilmaa noin 0 – 50 m/s nopeudella, vesisumun ja poistoilman hiukkasten nopeusero on keskimäärin todella suuri. Poistoilma myöskin työnsi suurimman osan ilmasta ulos, jolloin vettä ei jäänyt paljoa sykloniin. Veden jäämisen sykloniin pelätään likaannuttavan syklonin seinämiä, jos turvepöly tarttuu veteen ja jää syklonin seinämiin kiinni. Imuvaunun tapauksessa sykloni erottaa poistoilmasta suurimman osan suurista hiukkasista. Poistoilman reunimmaisilla ilmamassoilla on korkein liikemäärä, kun taas syklonin keskellä aksiaalinen nopeus on lähellä nollaa. [79]

Systeemiä, jossa vesisumutus tapahtuu virtausputkistossa mutta ei syklonissa, kutsutaan sumutustorniksi. Myös edellä esitelty imuvaunu vesisumutus tapahtuu sumutustornin tapaiseen vedensumutustekniikkaan. Syklonitorniksi taas kutsutaan systeemiä, jossa vesisumutus on asennettu sykloniin sisään. Monessa nykyaikaisessa syklonissa, jonka toiminta on yhdistetty vesisumuun, vesisumu on asennettu syklonin sisälle, koska se lisää vesisumun vaikutusaikaa ja hiukkasten sitoutumista pisaroihin. Tällöin pienemmätkin hiukkaset törmäävät vesipisaroihin, jolloin muodostuneen hiukkasen liikemäärä on huomattavasti suurempi kuin yksittäisen pienen hiukkasen. Tällöin myös suurempi osa ja pienemmistä hiukkasista sitoutuu syklonissa. Tutkimusten mukaan syklonitornit omaavat suuremman keräystehokkuuden hiukkasille kuin sumutustornit. Syklonitornin keräystehokkuus partikkeleille $D_p > 5 \mu\text{m}$ on 95 % ja alle mikrometrin kokoisille partikkeleille se on 60 – 75%. [37]

Kuten mainittua, imuvaunun sumutuksen asennukseen vaikuttavat myös muut seikat, kuten syklonin mahdollinen likaantuminen. Lisäksi imuvaunun vesisumutuksen toimintaa ei ole vielä testattu nykyisellä asettelulla, joten sen erotuskyky saattaa olla jo nyt riittävä, eikä teknisille muutoksille ole tarvetta.

3.4 Pölynhallintajärjestelmän vedenkulutusmittaukset

Tässä kappaleessa esitellään vedenkulutusmittaukset, jotka tehtiin mekaanisen kokoojavaunun pölynhallintajärjestelmän korkeapainepumpulle kesällä 2018.

3.4.1 Vedenkulutusmittausten tavoitteet

Opinnäytetyön vedenkulutusmittausten tavoitteena on saada tietoa mekaanisen kokoojavaunun korkeapainepumpun vedenkulutuksesta keruuna aikana sekä keruuajan ulkopuolella. Käytännössä siis mitattiin painepumpun vedenkulutusta alikappaleessa 3.4.2 esitetyin tavoin. Vedenkulutuksen arvion on oltava luonteeltaan sellainen, että sen avulla voidaan arvioida pölynhallintajärjestelmän käyttömahdollisuuksia ja mahdollisia parannuksia tulevaisuudessa. Vedenkulutusta pyritään optimoimaan, niin että vesisumun pölynsidonta on tehokasta mutta pumpun vedenkulutus on riittävän alhaista, jotta vesisäiliötä tarvitsee työpäivän aikana täyttää korkeintaan yhden kerran.

Mittausten ja käyttökokemusten pohjalta tehdään parannusehdotuksia laitteistoon. Ehdotuksilla pyritään löytämään painevesisumutuksen laitteiston toimivuutta ja käytettävyyttä kenttäolosuhteissa sekä tekemään veden käyttösuunnitelma, jota noudattamalla painepumpun pumpun vedenkulutus työpäivän aikana on tehokasta sekä pölynhallinnan että veden riittävyyden kannalta.

3.4.2 Mittausmenetelmät

Vedenkulutusmittaukset ilman turpeen keruuta tehtiin yhden päivän aikana laitteistolle, jonka esittely löytyy kappaleesta 3.3. Mittausten aikana mekaaninen kokoojavaunu käynnistettiin varikkoalueella ja vesisumutus tapahtui koneen ollessa paikoillaan, eli keruuta ei tehty samanaikaisesti. Mittauksia tehtiin yhteensä kuusi ja niissä seurattiin painepumpun vedenkulutusta tässä alikappaleessa myöhemmin kerrottavalla tavalla.

Vedenkulutusta seurattiin myös kappaleessa 4.4 esiteltävien pölymittauksien yhteydessä. Viimeisen pölymittauspäivän 22.8.2018 ajoseurantadatasta pystytään päättämään ajat, jolloin vesisäiliö käytiin täyttämässä. Mittausmuitiinpanoihin taas oli merkitty tiettyjen mittausten oheen arviot sumutuksen jälkeisestä vesitilavuudesta säiliössä, ennen kun vesisäiliö täytettiin uudelleen. Mittauksien numerointi löytyy liitteestä A. Vesisäiliö täytettiin vesisumutusmittausten 14 ja 17 jälkeen. Myös mittauksessa 15 käytettiin vesisumutusta näiden mittausten välillä. Mittauksissa 14 ja 15 käyttöpaine oli 37 bar ja mittauksessa 17 se oli 75 bar. Mittauksiin käytetyt ajat voitiin arvioida mittausvideoiden perusteella. Mittaukselle 14 laskettiin vedenkulutus 37 baarin käyttöpaineella ja mittauksille 15 ja 17 niiden käyttöpaineiden painotetun keskiarvon paineella 52 bar. Näin saatiin laskettua vedenkulutus kahdella eri pumpun käyttöpaineella käytännön keruutyön aikana. Koska

sumutuslaitteisto oli puhdistettu kaksi päivää sitten, kaikki laitteiston 18 sumutussuutinta olivat toimintakuntoisia ja sumuttivat vettä mittauksen aikana.

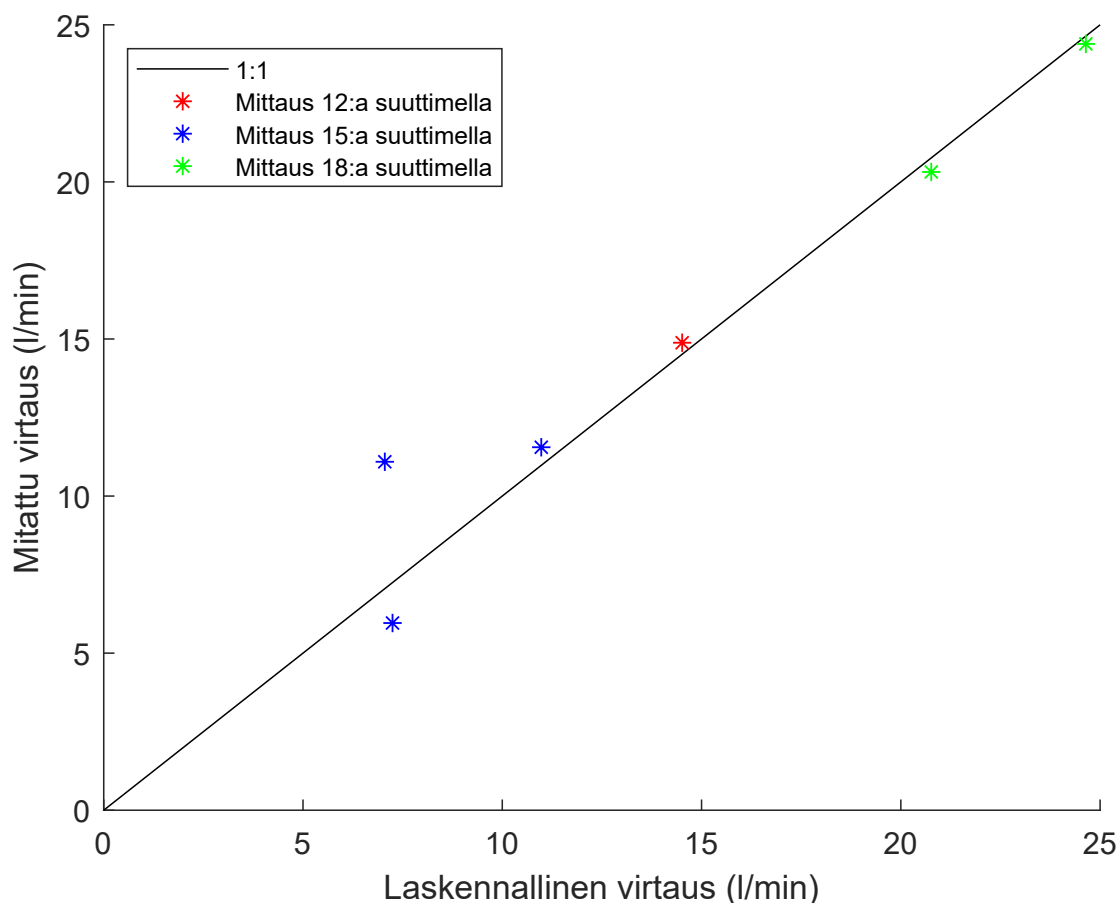
Varikkomittauksissa tutkittiin korkeapainepumpun vedenkulutusta eri sumutussuutinmäärillä ja käyttöpaineilla vaunun ollessa paikoillaan varikolla, eli turpeenkeruuta ei tapahtunut samanaikaisesti. Mittaukset jaettiin kahteen asetukseen. Ensimmäisessä asetuksessa vettä ruiskuttavia sumutussuuttimia oli käytössä samanaikaisesti 15. Systeemiin oli kytketty yhteensä 18 suutinta, mutta kolme oli tukossa, joten käytössä oleva maksimi suutinmäärä oli 15. Suuttimista 11 kappaletta oli mallia H1/4VV-950050 ja neljä kappaletta oli mallia H1/4VV-6502. Toisessa asetuksessa molemmiin puolin vaunua kaksi sumutuselementtiä kytkettiin pois päältä, jolloin käytössä oli yhteensä 12 sumuttavaa suutinta. Suuttimista 10 kappaletta oli mallia H1/4VV-950050 ja kaksi kappaletta oli mallia H1/4VV-6502. Vedenkulutus määritettiin mittaamalla sumutukseen kulutetun veden tilavuus sekä sumutukseen kulunut aika. Sumutusaika oli varikkomittauksissa 5 – 10 minuuttia. Vesi-pumpun vesi pumpattiin säiliöstä, jonka sivuun on asennettu kaksi läpinäkyvää letkua veden pinnan korkeuden määrittämiseksi. Vedenpinnan korkeus mitattiin sumutuksen alussa ja lopussa. Kun säiliön poikkipinta-ala tiedettiin, saatiin alku- ja loppukorkeuden sekä poikkipinta-alan avulla määritettyä sumutukseen kulutetun veden tilavuus. Tämä tilavuus jaettiin sumutukseen kuluneella ajalla, jolloin saatiin laskettua vedenkulutus.

3.4.3 Mittausten suorittaminen ja tulokset

Kuvaan 3.8 on kerätty vedenkulutusmittausten tulokset. Vedenkulutusmittauksia tehtiin yhteensä kahdeksan, joista kuusi onnistui. Varikkomittauksia eli vedenkulutusmittauksia ilman turpeen keruuta tehtiin kuusi. Niissä ensimmäinen mittaus aloitettiin aina täydellä vesisäiliöllä ja puolet säiliön vedestä ruiskutettiin mittauksen aikana. Seuraavassa mittauksessa vesisäiliön täyttöaste oli aluksi puolella välissä ja säiliö ruiskutettiin tyhjäksi. Jälkimmäisessä tapauksessa vedenkulutuksen määrittämiseen tuli ongelmia, koska säiliön vedenpinnan korkeuden osoittavassa letkussa vedenpinta nousi nopeasti, kun säiliö oli lähes tyhjä. Tällöin ei pystytty määrittämään vedenkulutusta mittauksen aikana, koska ei tiedetty, milloin vesi oli säiliöstä loppunut.

Toinen ongelma ilmeni, kun sumuttavien suuttimien lukumäärää vähennettiin 15:stä suuttimesta 12:aan suuttimeen. Tällöin virtaus kiihtyi selvästi, joka näkyi myös pumpun käyttöpaineen kasvuna nopeasti 25 baarista 50 baariin. Koska paineen nousu tapahtui nopeasti, oletettiin mittauksen pumpun käyttöpaineeksi tässä mittauksessa 50 bar suunnitellun 25 bar sijaan. Tapahtuman vuoksi mittauksia pienemmällä suutin määrällä ei kuitenkaan jatkettu. Ennakoimaton paineen nousu suutinmäärän vähennyksen yhteydessä saattoi johtua laitteiston putkien tukkoisuudesta.

Mittaustuloksia verrattiin valmistajan esitteestä löytyvien suutintietojen ja paine-vedenkulutusverrannon avulla muodostettuihin laskennallisiin arvioihin, joiden laskemiseen voi tarkemmin perehtyä alikappaleessa 3.3.1. Kuten kuvasta 3.8 nähdään, onnistuneiden



Kuva 3.8. Vedenkulutusmittausten tulokset. Mittaustulokset on esitetty 1:1-suoran avulla. Mitä lähempänä mittauspiste sijaitsee suoraa, sitä tarkemmin se vastaa laskennallista arvoa. Siniset ja punaiset mittauspisteet kuvaavat varikkomittausten dataa ja vihreät pisteet käytännön pölymittauksista arvioitua dataa. Loput kaksi mittauksista epäonnistuivat.

mittausten mittauspisteet ovat hyvin linjassa teoreettisen mallin kanssa. Varsinkin käytännön pölymittauksien ohella mitatut arvot osuivat erittäin lähelle laskennallisia arvoja. Varikkomittausten arvoissa hajonta 1:1-suoran suhteen oli suurempaa. Tämä saattaa kertoa mittaustekniikan puutteellisuudesta, koska vedenpinnan korkeuden määrittäminen ennen ja jälkeen mittauksen oli hankalaa myös onnistuneissa mittauksissa. Myöskin suuttimien tukkoisuus saattoi vaikuttaa mittaustuloksiin varikkomittauksissa. Pisteiden osuessa kuitenkin kokonaisuudessaan hyvin 1:1-suoran läheisyyteen oletetaan, että laskennallisia arvoja voidaan käyttää vedenkulutuksen arvioinnissa, eli vedenkulutusta tässä käytännön sovelluksessa voidaan arvioida suoraan sumutusuuttimien valmistajalta saatavan tiedon pohjalta.

3.4.4 Korkeapainepumpun vedenkulutuksen vähentäminen

Painepumpun käytön tarve riippuu aina alueesta, sääolosuhteista ja ympäristöviranomaisien asetuksista, joten sen käytölle ei voida kehittää mitään yleispätevää mallia. Vesimun käytön tarvetta voidaan kuitenkin arvioida mittausten aikaisen turpeenkeruun avulla,

koska dataa työkoneen liikkumisesta mittausten aikana tallennettiin GPS-paikannuksella. Vapo Oy:n tavoite on saada vedenkulutus sellaiselle tasolle, että yhden työvuoron aikana vesisäiliötä olisi täytettävä korkeintaan kerran. Esimerkiksi Sompanevilla on ELY-keskuksen ympäristöluvan pohjalta vuonna 2008 tehdyn korkeimman hallinto-oikeuden päätöksen mukaan rajoitettava keruusta johtuvaa turvepölyn määrää lohkoilla 16 (39 ha) ja 14 (12,56 ha) sekä lohkon 12 läntisessä osassa (13,97 ha) [45]. Erityisesti näillä lohkoilla vesisumun käytölle on siis tarvetta. Yhteensä Sompanevilla on tuotannossa olevaa pinta-alaa vuoden 2015 aluetta kuvaavan kartan mukaan 284,5 ha.

Listataan seuraavaksi pölymittauspäivän 22.2.2018 tietojen perusteella oleellisia havain-toja, jotka kuvaavat työvuoron kulkua turpeen keruussa ja lasketaan tietojen perusteella työvuoron aktiivinen keruu-aika ja sen aikana kerätty pinta-ala. Lasketaan myös keruu-ajoille ja niitä vastaaville pinta-aloille vesisumutukseen vaadittava veden tilavuus ja vesisäiliön täyttökertojen määrä. Seuraavassa listauksessa esitetyt arvot ovat pölymittauspäivän 22.2.2018 laskettuja tai muulla tavoin arvioituja keskiarvoja.

- Työvuoron pituus on kahdeksan tuntia
- Työvuoron aikana pidetään taukoja yhteensä puoli tuntia (tämä on oletus).
- Siirtymä työpäivän alussa varikolta keruualueelle kesti noin 10 min. Saman verran kesti matka keruualueelta varikolle työpäivän lopussa
- Vaunu kerättiin täyteen noin kahdeksassa minuutissa
- Saran leveys oli noin 20 m
- Keruunopeus oli noin 2,25 km/h
- Siirtymämatka keruupaikalta lähimmälle aumalle oli yksi kilometri
- Siirtymänopeus keruupaikalta lähimmälle aumalle oli 15 km/h
- Aumaan tyhjäys kesti noin viisi minuuttia
- Pumpun vedenkulutus oli noin 20 l/min

Tiedoista laskettuna turvetta kerättiin työvuoron aikana noin 10 hehtaaria. Arvio on realistinen ottaen huomioon, että Vapo Oy:n ilmoittaman tiedon mukaan mekaanisen kokooja-vaunun JMK-35 keruunopeudeksi on laskettu 1,2 ha/t, jolla työvuoron aikana kerättäisiin noin 9 hehtaarin alueelta turvetta. Taulukkoon 3.5 on kerätty edellisen listauksen pohjalta lasketut tulokset.

Optimaalista vedenkulutuksen vähennystä laitteistossa on vaikea arvioida, joten sitä on testattava erikseen. Taulukon 3.5 laskennassa käytetyt lukuarvot 25 %:a ja 50%:a esitetään lähinnä mallintamaan mahdollisia tuloksia, jos vedenkulutusta lasketaan. Nykyisellä vedenkulutuksella säiliö tyhjenee liian nopeasti, ja jatkuva vesisäiliön täyttäminen hidastaisi työntekoa merkittävästi. Vedenkulutusta 25%:a vähentämällä voidaan kerätä merkittävä alueelta turvetta vesisumun ollessa käytössä. Tällöin voidaan suunnitella keruureitti, niin että päivän aikana kerätään vain välillä alueilta, joilla on pölyämisrajoituksia ja muu aika kerätään rajoittamattomilta alueilta. Yleensä ELY-keskuksen turpeen keruulle asettamat rajoitteet ovat tuulirajoitteita, jolloin pölyämisrajoituksen omaavalla alueella ei

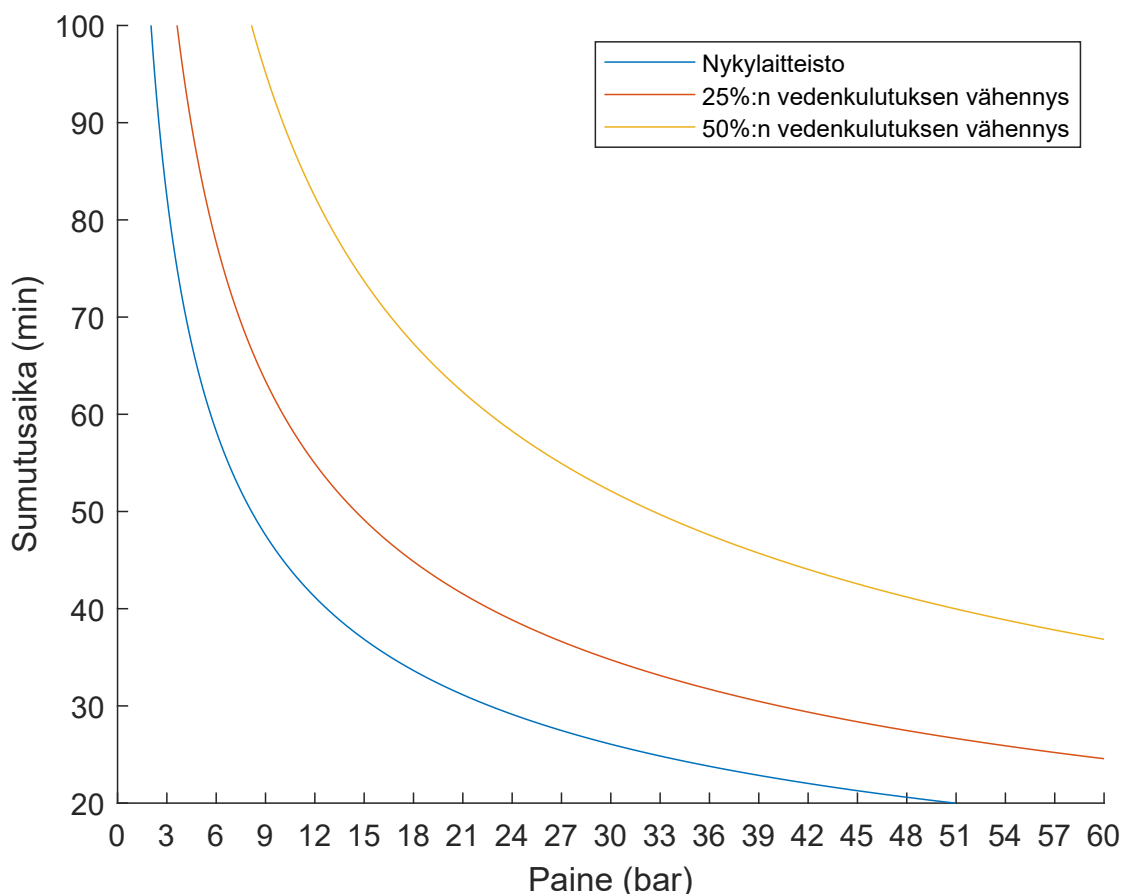
Taulukko 3.5. Turpeen-keruun aikaiseen vesisumutukseen vaadittava vesitilavuus sumutusaikaa ja kerättyä pinta-alaa kohden. Lisäksi taulukkoon on laskettu vaaditut vesisäiliön täyttökerrat työvuoron aikana nykyisellä vedenkulutuksella sekä sitä 25% ja 50%:a pienemmällä vedenkulutuksella. Vesisäiliön tilavuus on 488 litraa.

Pinta- ala (ha)	Sumutusaika (min)	Vedenkulutus nykylaitteis- tolla (l)	Vesisäiliön täyttökerrat työvuoron aikana		
			Nyky- lait- teis- tolla:	25 %:n veden- kulutuksen vähennys:	50 %:n veden- kulutuksen vähennys:
1	13	267	0	0	0
2	27	533	1	0	0
4	53	1067	2	1	1
6	80	1600	3	2	1
8	107	2133	4	3	2
10	133	2667	5	4	2

tarvitse pitää vesisumua käytössä jatkuvasti tuuliolosuhteiden ollessa suotuisat. Vähentämällä vedenkulutusta 50%:iin voidaan kerätä suurin osa työvuoron aktiivisesta keruustajasta vesisumutus päällä, jolloin ajosuunnittelun rooli on vähäinen. Näin suuri vähennys vedenkulutuksessa kuitenkin tekisi todennäköisesti vesisumutuksen pölynhallinnasta tehotonta. Vedenkulutusta voidaan teoriassa laskea, koska vesimäärän vähenemä voidaan kompensoida laitteiston teknisillä muutoksilla. Seuraavaksi perustellaan, miksi vedenkulutusta voidaan laskea nykyisestä.

Kesän mittalaitemittauksissa käyttöpaine 37 bar osoittautui tehokkaaksi käyttöpaineeksi pölynhallinnassa. Laitteiston pölynsidontatehoa ei testattu alemmilla käyttöpaineilla. Mittauspäivänä 21.8.2018 vesisumun käyttöpaine oli 37 bar ja mittauspäivänä 22.8.2018 37 tai 75 bar. Molempina mittauspäivinä kokonaisuudessaan pölynsidonta oli tästä huolimatta suunnilleen sama, vaihdellen mittaustekniikasta riippuen noin 60 %:n ja 80 %:n välillä. Käyttöpaineen muutoksen ei huomattu vaikuttavan merkittävästi pölynsidontatehoon, vaan vedenkulutukseen. Toisaalta myös absoluuttinen pölyäminen oli suurempaa jälkimmäisenä mittauspäivänä, joten pölynsidontateho olisi saattanut tällöin jäädä tässä opinnäytetyössä laskettuja tuloksia alahaisemmaksi, jos käyttöpainetta ei olisi korotettu. Tietyissä tutkimuksissa on havaittu, että pisanaropeuden alentaminen ei ennen tiettyä raja-arvoa muuta merkittävästi pölynsidontatehoa [7]. Esimerkiksi tutkimuksessa [7] pisarako'illa 250 μm ja 350 μm pölynsidontatehokkuus putosi merkittävästi vasta, kun lähtönopeutta oli alennettu 50 m/s:ta 30 m/s:iin. Koot 250 μm ja 350 μm vastaavat suuruudeltaan samaa kokoluokkaa, kuin opinnäytetyön pölymittauksissa käytetyn vesisumun pisarakoko. Pölymittauksissa käytetyt paineet vedelle ylittivät suuttimien käyttösuositusten paineet. Kuvaan 3.9 on laskettu sumutusaikoja eri vedenkulutusarvoilla vedenpaineen funktiona, kun vesisäiliön tilavuus on 488 litraa.

Alikappaleen 4.4.7 pölymittausten tuloksista havaitaan, että tämänhetkiselä vedenkulu-



Kuva 3.9. Kuvassa esitetään korkeapainepumpun sumutusaika, kun käytettävissä olevan veden tilavuus oli 488 litraa. Paine tarkoittaa korkeapainepumpun sumutukselle asettamaa käyttöpainetta ja sumutusaika aikaa, joka pystytään yhtäjaksoisesti sumuttamaan, ennen kuin vesi loppuu säiliöstä. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä 2.3.2019 sumutuslaitteistossa oli asennettuna 14 kappaletta H1/4VV-950050-suuttimia ja neljä kappaletta H1/4VV-6502- suuttimia. Mikäli vedenkulutusta vähennetään, sumutusaika nousisi merkittävästi, kuten kuvaajasta nähdään.

tuksella pölynhallinta on tehokasta, eikä vedenkulutuksen lisäämisellä saavutettaisi ainaakaan merkittävää hyötyä. Sen sijaan, jos järjestelmään tehtäisiin luvussa 5 esitetyjä teknisiä muutoksia, pystyttäisiin pölynhallinta pitämään tehokkaana, vaikka vedenkulutusta vähennettäisiinkin. Tämän vuoksi tulevaisuudessa korkeapainepumpun toimintaa kannattaa testata pienemmilläkin käyttöpaineilla, jolloin vedenkulutus pienenis. Mikäli tämä ei olisi toimiva ratkaisu, voidaan vedenkulutusta vähentää myös suutinvalinnoilla tehden muutoksia niiden suuntauksiin ja paikkoihin.

4 PÖLYMITTAUKSET JA VESISUMUN VAIKUTUS MITTAUKSIIN

Tässä luvussa tarkastellaan ulkoilman hiukkaspitoisuuksien havainnointia ja sen haasteita opinnäytetyön tapaisessa mittausympäristössä. Näiden pohjalta järjestettiin pölymittaukset, joista kerrotaan kappaleessa 4.4. Kappaleessa 4.1 pohditaan eri tutkimusten pohjalta optisten mittalaitteiden toimivuutta yleisesti ulkoilman aerosolimittauksissa. Kappaleessa 4.2 pureudutaan käytännön seikkoihin, jotka tulee ottaa huomioon, kun tehdään turvepölymittauksia muuttuvassa ympäristössä liikkuvan pölylähteen läheisyydessä. Kappaleessa 4.3 tarkastellaan erikseen vesisumun vaikutusta optisesti mitattuihin pölymittauksiin ja vesisumun hallintaa mitattavassa näytteessä. Kappaleessa 4.4 esitellään opinnäytetyön aiheen mukaiset kesällä 2018 toteutetut turpeenkeruun pölymittaukset. Alikappaleessa 4.4.2 esitetään mittaustekniikka ja laitteisto, jolla kesän mittaukset tehtiin. Siinä otetaan huomioon tässä kappaleessa esitellyt olosuhteiden asettamat erityisvaatimukset, sekä mittaustavoitteiden monimuotoisuus.

4.1 Optisten mittalaitteiden edut ja haasteet

Kuten kappaleessa 2.5 huomattiin, käytetään myös turvepölytutkimuksessa hyödyksi optisia mittalaitteita. Tässä kappaleessa kerrotaan enemmän niiden hyödyistä ja haitoista pölymittauksissa.

Pölytutkimuksessa käytetään yleensä valoa sirottavia mittauslaitteita, koska ne antavat mitattavasta pölypilvestä reaaliaikaista dataa ja ovat helppokäyttöisiä. Ne ovat kevytrakenteisia, joten niiden liikuttaminen paikasta toiseen käy helposti. Optiset mittalaitteet eivät kerää hiukkasia, vaan mitattu hiukkaspitoisuus puhalletaan laitteesta ulos. Tämän vuoksi niissä ei tapahdu ylisaturoitumista, kuten esimerkiksi impaktoreiden keräysalustoilla ja suodatinkeräyksessä, jotka suurilla pölypitoisuuksilla ja pitkillä keräysjaksoilla voivat täytyä liikaa. Optisia mittalaitteita ei myöskään tarvitse yleensä purkaa kesken mittausten, kuten esimerkiksi impaktoreille saatetaan joutua tekemään, jos keräysalusta vaihdetaan mittauksen vaihtuessa. Optiset mittalaitteet voidaan yleensä kytkeä tietokoneeseen, jolloin niiden reaaliaikaista mittaussignaalia voidaan tarkastella visuaalisesti kesken mittauksen.

Optisten mittalaitteiden huono puoli on, että ne voivat antaa epätarkkoja tuloksia. Tietyis-

sä tapauksissa optisten mittalaitteiden tulokset voivat olla referenssiarvoihin nähden jopa kaksinkertaiset [43]. Esimerkiksi tutkimuksen Smith et al. mukaan LED:illä ja valkoisella valolla toimivien mittalaitteiden mittaustarkkuuteen vaikutti mitattavan pölyn kokojakuman muuntelu [53]. Myös materiaali voi vaikuttaa optisen mittaustulokseen [61].

Pitoisuuksien suuruudet voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Tutkimuksessa [61] mittalaitteilla oli niille ominainen pitoisuusalue, jolla ne antoivat tarkkoja tuloksia. Osa laitteista mittasi epätarkasti pieniä pitoisuuksia, kun taas osalle laitteista suurten pitoisuuksien mittaaminen oli epätarkkaa. [61] Optisten mittalaitteiden referenssimittalaitteina käytetään gravimetrisiä mittalaitteita, kuten myös edellisessä tutkimuksessa [61] oli tehty [6, 61, 70].

Turvepölymittauksissa mittalaitteen on pystyttävä mittaamaan suuria massapitoisuuksia, koska pölyäminen keräysvaiheessa on voimakasta. Tämän vuoksi mittalaitteen on oltava sellainen, että sillä pystytään mittaamaan jopa selvästi yli 100 mg/m^3 suuruusjää. Erittäin lähellä lähdettä päästöt saattavat olla tähänkin arvoon nähden moninkertaiset, kuten kappaleessa 2.3 huomattiin. Toisaalta samassa kappaleessa huomattiin myös, että mitattava massapitoisuus voi olla hyvinkin pieni riippuen sääolosuhteista ja mittaustäisyydestä lähteeseen nähden. Ilman kosteus vaikuttaa pölyn mittaustarkkuuteen. Mitä kosteampaa ilma on, sitä epätarkempia mittaustuloksia saadaan. [12] Ilmankosteuden vähentämiseksi on kehitetty mittalaitteisiin erilaisia tekniikoita, joista kerrotaan lisää kappaleessa 4.3.

Koska mittalaitteiden laatu vaihtelee, on mittalaitteiden laatuun liittyen kerätty tietoa liitteen B. Siinä perehdytään Ilmatieteen laitoksen laitevertailun pohjalta eri laitevalmistajien ulkoilman hiukkaspitoisuuksien mittaamiseen tarkoitettujen laitteiden ominaisuuksiin ja laatuun. Tämä liite on luotu tulevaisuutta varten, mikäli tulevaisuudessa Vapon työmaille mitataan turvepölyä ja halutaan harkita myös muita vaihtoehtoja mittaustulokseksi.

4.2 Mittauksien epätarkkuustekijät ja niiden minimointi

Olosuhteet ja ympäristö turveneella tuovat mukanaan useita mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä, joista oleellimmat käydään läpi seuraavaksi.

Ilmakehän stabiilius muuttuu päivittäin. Stabiiliuteen vaikuttaa auringonpaiste, pilvisyys ja tuuli. Stabiilius voidaan määrittää alikappaleessa 2.5.1 esitellystä tutkimuksesta [78] löytyvän taulukon avulla. Tuuli on erityisen tärkeä mittaustuloksien epätarkkuustekijä, koska hiukkaset kulkeutuvat vapauduttuaan ilmaan yleensä tuulen suuntaisesti. Tämän vuoksi mittaustuloksen tulisi olla tuulen alapuolella, ellei mittalaitteella mitata taustapitoisuutta. Taustapitoisuus mitataan tuulen yläpuolelta, jolloin selvitetään mitattavaan lähteeseen kuulumattomat hiukkaspitoisuudet alueella. Näin minimoidaan muiden pölylähteiden aiheuttama virhe mittaustuloksissa. [60]

Turpeen ominaisuuksista kosteus, suotyyppi ja maatuneisuus vaikuttavat turpeen pölyä-

miseen. [56, 79]. Näin ollen useasta eri turvelaadun pölyämisestä saadut mittaustulokset eivät ole keskenään suoraan vertailukelpoisia. Turvepölyn kokojakauma ja massapitoisuus vaihtelevat samalla suolla jopa saroittainkin huomattavasti [79]. Myös keräyssäiliön täyttyminen lisää pölyämistä [56].

Imukokoojavaunun pölyn havainnointi on helpompaa, kuin mekaanisen kokoojavaunun tapauksessa, koska päästölähde voidaan rajata tarkasteltavaksi syklonin poistoilmaan. Mekaanisesta kokoojavaunusta emittoituu pölyä renkaista, turpeennostohihnalta ja säiliössä olevista väljistä saumoista ja aukoista. Useampi merkittävä lähde vaikeuttaa pölymittauksien järjestelyjä, koska usean paikan samanaikaisesta pölyämisestä on vaikeampaa tehdä edustavaa mittausta. Mekaanisen kokoojavaunun keruusta kuvattuihin videoihin perustuen voidaan arvioida, että merkittävä määrä näkyvästä pölystä emittoituu mekaanisen kokoojavaunun hihnalta. Tällöin tuulen puhaltaessa vaunun etusektorista takasektoriin pysyttään pölypilvi yleensä mittaamaan edustavasti.

Myös traktori aiheuttaa hiukkaspäästöjä renkaiden lisäksi pakokaasupäästöillään. Pakokaasupäästöjä pidetään kuitenkin yleisesti niin pienenä tekijänä muihin virhelähteisiin ja pölyämiseen verrattuna, ettei niitä oteta turvepölymittauksissa huomioon [27, 39, 60].

4.3 Vesisumun hallinta mittauslaitteistoilla- ja tekniikoilla

Opinnäytetyön mittauksissa vesisumun vesipisaroita ei poistettu mitattavasta ilmasta tai vähennetty mitattavan näytteen ilmankosteutta, mutta vesisumun vaikutuksesta mittauksiin ja sen hallinnasta eri tekniikoilla on kokonaiskuvan luomiseksi hyvä tietää seuraavaksi esiteltäviä perusasioita.

Pölyhiukkaspitoisuuksien mittaaminen vesisumun läheisyydessä aiheuttaa mittaustuloksiin huomattavan virheen, jos mittalaitte tulkitsee vesipisarat pölyhiukkasiksi. Vesi voi myös kondensoitua hiukkasen pinnalle, jolloin mittalaitteen mittaama hiukkaskoko on todellista pölyhiukkasta suurempi. Tämän vuoksi vesisumua mittausilmassa hallitaan erilaisilla tekniikoilla. Yleinen ratkaisu on lämmitetty sisääntuloputki, joka voi lämpöominaisuuksistaan riippuen joko höyrystää mittausilmassa olevan veden tai alentaa mittausilman suhteellista kosteutta. Esimerkiksi tutkimuksessa Tasic et al. 2012 sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa 40-60 %, kosteuden aiheuttamien haittojen minimoimiseksi oli Osiris-mittalaitteeseen asennettu sisääntuloputki, joka on lämmitetty 50°C:een [55] alentamaan mittausilman suhteellista kosteutta. Vesisumun vaikutuksen alaisen ilman suhteellinen kosteus voi olla yli 100 %. Näin kostean ilman riittävän suuren suhteellisen kosteuden aleneman luomiseksi on putki lämmitettävä paljon kuumemmaksi. Kuumaa ilmaa ei myöskään voida johtaa suoraan laitteeseen, joten lämmitettyä ilmaa on ennen mittalaitteeseen pääsyä laimennettava viileällä ja kuivalla ilmalla, joka on puhdistettu epäpuhtauksista. Esimerkiksi Dekati Ltd valmistaa lämpöputkia, jotka voidaan lämmittää jopa 300°C:een asti.

Tutkimuksessa Deary et al. Practicalities of mapping *PM*₁₀ and *PM*_{2.5} concentrations on

city-wide scales using a portable particulate monitor [12] on tutkittu optisen mittalaitteen Turnkey Instruments Ltd:n Dust maten suorituskykyä lämmitetyllä sisääntuloputkella varustettuna korkeissa suhteellisissa kosteuksissa. Sen mukaan lämmitetty sisääntuloputki poistaa tehokkaasti vesipisaroita ilmasta ja näin ollen mittaustulokset antavat referenssimittauksiin verraten tarkkoja arvoja. Suhteelliset kosteudet tutkimuksessa olivat välillä 57 % ja 93 %.[12]

Toinen tapa poistaa pölyn seasta vesisumu on eliminaattori, joka poistaa veden ilmasta kemiallisesti. Esimerkiksi tutkimuksessa Cecla et al. Adding steam to control dust in mineral processing eliminaattori koostuu 70 cm pitkästä ja 2,5 cm paksusta putkesta, jota ympäröi 2,5 cm paksuinen kalsiumsulfaatti-kuivikekerros. Kun kostea ilma kulkee putkesta, kalsiumsulfaatti imee ilmassa leijuvan veden itseensä. Menetelmän on todettu toimivan tehokkaasti, eikä se vaikuta mitattaviin pölyhiukkasiin. [5]

Koska opinnäytetön mittauslaitteistoon ei aseteta mittausilman veden absorptiota tai lämmitystä, on vesisumun vaikutus mittaustuloksiin otettava muilla keinoin huomioon, joista on kerrottu alikappaleissa 4.4.2 ja 4.4.6.

4.4 Kesän 2018 turvepölymittaukset

Kokonaisuudessaan opinnäytetyön pölymittaukset jakautuvat pölyämisen havainnointiin ilman mittalaitteita ja pölyn mittaamiseen reaaliaikaisella optisella mittavälineellä ja suodatinkeräyksellä. Silmämääräisellä havainnoinnilla arvioitiin keruun aikaisen pölypilven kokoa ja pitoisuutta vesisumun ollessa joko käytössä tai pois käytöstä havainnoiden samalla ympäristön parametrejä, kuten tuulen nopeutta, ilman kosteutta ja lämpötilaa. Silmämääräisen tarkastelun avulla selvitettiin kokonaiskuva kentän pölyämisestä, painepumpun toiminnasta ja ympäristön vaikutuksesta mittauksiin. Tarkastelun tuloksia käytettiin apuna suunnitellessa mittalaitteilla tehtäviä pölymittauksia. Tarkastelua seuranneet pölymittaukset reaaliaikaista dataa tallentavalla mittavälineistöllä antoivat enemmän ja tarkempaa dataa, joten silmämääräisen tarkastelun tuloksista ei tässä opinnäytetyössä raportoida. Tässä kappaleessa kerrotaan kesän turvepölymittauksista mittalaitemittausten osalta.

Mittausten tavoitetta eritellään ja kuvataan alikappaleessa 4.4.1. Alikappaleessa 4.4.2 kerrotaan käytetyistä mittalaitteista, mittausmenetelmistä. Alikappaleessa 4.4.3 kerrotaan muutoksista, joita mekaaniseen kokoojavaunuun tehtiin tai suunniteltiin tehtävän ennen mittauksia. Alikappaleessa 4.4.4 kerrotaan pölymittausten suorittamisesta ja alikappaleessa 4.4.5 esitellään mittaustulosten käsittelyä. Alikappaleissa 4.4.7 ja 4.4.8 esitellään mittaustuloksista lasketut tulokset ja alikappaleessa 4.4.9 analysoidaan laskettuja tuloksia ja niiden luotettavuutta.

4.4.1 Mittausten tavoitteet

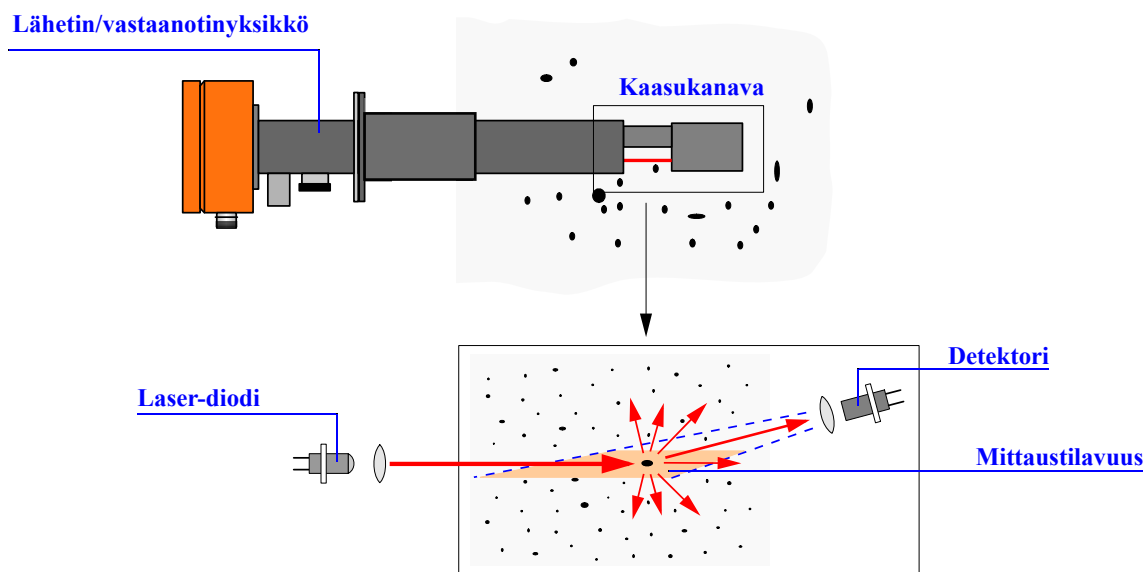
Opinnäytetyön pölymittausten tavoitteena on saada tietoa mekaanisen kokoojavaunun turpeenkeruusta aiheutuvasta pölyämisestä ja kokoojavaunuun asennetun korkeapaine-vesipumpun sumuttaman vesisumun pölynhallinnan toimivuudesta. Pölymittaukset suoritettiin mittaamalla keruun aikaista pölypilveä alikappaleessa 4.4.2 kerrotulla tavalla sekä vesisumutuksen ollessa käytössä että pois käytöstä, jolloin mitatun datan avulla voitiin arvioida pölynhallintajärjestelmän pölynsidontatehoa. Mittausten pohjalta on pystyttävä arvioimaan pölynsidontajärjestelmän käyttömahdollisuuksia ja mahdollisia parannuksia tulevaisuudessa. Pölymittauksista haluttiin reaaliaikaista dataa, jotta saatiin tarkempaa tietoa keruun aikaisesta pölyämisestä ja pölynsidonnasta. Lisäksi haluttiin selvittää pölynsidontalaitteiston toimintavarmuutta muuttuvissa keruuolosuhteissa.

Mittausten ja käyttökokemusten pohjalta tehtiin parannusehdotuksia laitteistoon, jotka on koostettu lukuun 5. Ehdotuksilla pyritään tulevaisuudessa minimoimaan keruuvaunun pölyäminen, löytämään painevesisumulle tehokas pölynsidontakonsepti sekä parantamaan laitteiston toimivuutta ja käytettävyyttä kenttäolosuhteissa. Lisäksi arvioitiin laitteistojen toimivuutta ja mittausmenetelmien soveltuvuutta opinnäytetyön mittauksissa.

4.4.2 Mittausmenetelmät ja mittalaitteet pölymittauksissa

Tässä alikappaleessa esitellään opinnäytetyön pölymittauksissa käytettyjä mittalaitteita sekä mittausmenetelmiä. Pölypitoisuuden mittaamiseen käytettiin SICK FW101 optista mittalaitetta sekä suodatinkeräystä. Ympäristön säädataa mitattiin Davis Vantage Pro2 langattomalla sääasemalla sekä mittauspaikan lämpötilaa erillisellä lämpötila-anturilla. Sääaseman säädatasta erityisesti haluttiin tuulen suunta, tuulen nopeus sekä lämpötila. Sääasema sijaitsi noin 500 – 1000 m päässä mittauspaikasta, riippuen alueesta, jossa mittauksia tehtiin. Mittauksissa kerättävän turpeen kosteusprosentti määritettiin joka saralta ja satunnaisilta saroilta määritettiin myös turpeen tuhkapitoisuus.

Perehdytään seuraavaksi SICK-hiukkasmittarin toimintaan ja ominaisuuksiin. SICK:in valonlähteenä toimii laser-diodi, jonka valo siroaa kuvan 4.1 mukaisesti pölyhiukkaspilvestä. Sironnutta valoa havaitsee detektori, joka on asetettu noin 15 ° kulmaan suhteessa siroamattoman lasersäteen kulkusuuntaan. Ilmaisimen signaali vahvistetaan elektronisesti ja lähetetään tietokoneeseen asennettuun dataloggeriin kuvattavaksi ja tallennettavaksi. SICK-mittalaite ja mittaukset tilattiin Ramboll Finland Oy:n ilmanlaatuyksiköltä. Mittalaitteen tehdasasetuksilla suurin mitattava massapitoisuus on $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ mutta tätä pystytään säätämään tarpeen mukaan. Rambollin tekemillä asetuksilla mittalaitteen havaittiin toimivan opinnäytetyön mittausten edellyttämällä tarkkuudella, joissa mitattavat keskimääräiset massapitoisuudet vaihtelivat mittauksissa noin $5 \text{ mg}/\text{m}^3$:sta noin $190 \text{ mg}/\text{m}^3$:een. Laitteen nollavirtasignaaliaksi oli asetettu 4 mA ja korkeimman mitattavan pitoisuuden signaaliaksi 20 mA . Mittalaite ei ole herkkä tärinälle ja se puhalttaa mittaustila-



Kuva 4.1. SICK FW101-mittalaite ja sen toimintaperiaate. Mittalaite mittaa optisesti pölyhiukkasten aiheuttamaa sirontaa. Detektorin havaitsema sironta aiheuttaa sähkövirtasignaalin, jonka vastaanotinyksikkö tulkitsee ja lähettää käyttäjälle. Kuva on piirretty SICK:n käyttöohjekirjasta [52] löytyvää kuvaa mukaillen.

vuuden ympärille suojailmaa, joka vähentää laser-diodin ja detektorin likaantumista. [52]

Koska SICK FW101:n mittaama virtasignaali riippui pölypilven kokojakaumasta ja optisista ominaisuuksista, mitattiin sen näytteenoton vierestä myös hiukkaspilven massaa erillisillä suodatinnäytemittauksilla, joiden suoritus ja tulosten laskenta tilattiin myös Rambollin ilmanlaatuysyksiköltä. Suodatinnäytteiden keräyksessä käytettiin laitteistoa nimeltään Zambellin Easy PLUS, jonka tarkkuus imuilman virtaukselle oli noin $\pm 2\%$. Hiukkasnäytteet kerättiin suodattimille, jotka punnittiin ennen ja jälkeen näytteenoton mikrovaa'alla. Vaa'an tarkkuus oli $10 \mu\text{g}$. Keräyksen aikana suodattimen läpi imettiin tunnettu tilavuus ulkoilmaa. Kun massanäyte oli kerätty ilmasta, siitä kuivattiin vesi pois. Kuivamassanäytteiden ja keräysten aikaisten imuilman tilavuuksien avulla laskettiin keskimääräinen pölypilven massapitoisuus jokaiselle ajanjaksolle, jolla suodatinnäyte kerättiin. Suodatinnäytteitä kerättiin mittauksissa ajanjaksoilta, joissa vesisumu oli käytössä tai pois käytöstä koko kyseisen ajanjakson. Näin toimittiin, koska vesisumu vaikutti SICK:in mittaamaan virtasignaaliin. SICK:illä mitatun virtasignaalin kesiarvo asetettiin mittausten jälkeen vastaamaan samanaikaisesti mitatusta suodatinnäytteestä laskettua massapitoisuutta. Näin lasketuista tuloksista laskettiin dataan sovitteet, joista saatiin arvio SICK:n virtadatan ja ilmassa leijuneen mitatun pölyn massapitoisuuden välille. Lisää tietoa arvion muodostamisesta ja sovitteista löytyy alikappaleesta 4.4.6.

Mittaukset tehtiin jahtausmittauksina, jotta saatiin riittävästi dataa lähteen pölyämisestä. Aiemmissa suomalaisissa turvepölytutkimuksissa [16, 27, 39, 40, 60, 79] tällaista lähestymistapaa ei ole käytetty, vaan mittalaitteet ovat olleet kiinteissä paikoissa mittausten ajan, eli niitä ei ole liikuteltu pölyn lähteen reaaliaikaisen liikkeen mukaan. Jahtausmittauksissa pyrittiin pitämään ajallinen etäisyys lähteeseen tutkimuksessa [72] esitetyn arvion mukaisena. Arvion mukaan pölypilvi ei horisontaalisesti dispersoidu merkittävästi, jos pölypil-

vi kulkeutuu lähteestä mittalaitteelle neljässä sekunnissa tai pienemmässä ajassa [72]. Tämän opinnäytetyön turvepölymittauksissa käytetty mittausasetelma esitetään kuvassa 4.2.

Mittalaitteet asetettiin peräkärriin. SICK-mittalaite asetettiin pystyyn kolmijalkatelineeseen, niin että se mittasi pölyä noin 1,5 m korkeudelta. Tämä korkeus vastasi hyvin aiemmassa tutkimuksessa tehtyjen pölymittausten korkeutta. Esimerkiksi tutkimuksessa [72] mittalaite oli asetettu 1,5 m korkeudelle ja tutkimuksessa [18] mittalaitteen asetuskorkeus oli 1,7 m. Kolmijalkatelineen molempiin etujalkoihin asennettiin pidike massanäytettä kerääville suodattimille SICK-mittalaitteen näytteenoton viereen. Vain karrin edestä katsottuna vasemmanpuoleinen suodatinkeruulaite oli toiminnassa mitausten aikana ja oikeanpuoleinen suodatinkeruulaite oli varalla, mikäli vasemmanpuoleinen laite olisi mennyt epäkuntoon. Oikean puoleiseen kolmijalkatelineen jalkaan asennettiin myös lämpötilanturi. Suodatinkeräyksen ilmapumput sekä SICK-mittalaitteeseen ja lämpötilanturiin kytketty tietokone suojattiin kannellisilla muovilaatikoilla. Mittalaitteet saivat virtansa peräkärriyssä olevasta generaattorista, ja peräkärri kiinnitettiin mönkijän vetokoukkuun.

Mittauksissa seurattiin mekaanista kokoojavaunua JMK - 55V sen kerätessä turvetta kentältä. Yleisin mittaustapa oli kerätä yhden saran (pituus noin 200 – 500 metriä) turpeet ja mitata keruun aikaista pölyämistä jahtausmittauksena edellä esitellyllä mittauslaitteistolla. Keruun jälkeen säiliö käytiin tyhjentämässä uutta mitausta varten. Mikäli kerätty sarka oli tarpeeksi lyhyt, keruuvaunun säiliöön jäi paljon tilaa. Tällöin kerättiin myös toisen lyhyen saran turve säiliöön pölyämistä mitaten, jonka jälkeen kerätty turve tyhjättiin säiliöstä aumaan. Mittauksen aikana vesisumutus oli joko käytössä tai pois käytöstä. Joissakin mittauksissa vesisumu kytkettiin käyttöön tai pois käytöstä kesken ajon, jolloin reaaliaikaisesta datasta nähtiin, miten vesisumu vaikutti keruun pölyämiseen asetuksen vaihdon yhteydessä.

Edellä esitettyä mitausta, jossa vesisumu kytketään käyttöön tai pois käytöstä kesken mittauksen, kutsutaan on-off mittauksiksi. On-off mittaukset ovat insinööritieteissä yleisesti käytetty menetelmä, kun halutaan selvittää jonkun systeemin kahden eri tilan välinen ero ja pitää samalla ympäristön vaikutus mittauksiin mahdollisimman yhdenmukaisena. On-off mittauksia on tehty esimerkiksi signaalinkäsittelyä koskevissa tutkimuksissa, kuten tutkimuksessa [1] sekä tiedonsiirtoteknologiota koskevissa tutkimuksissa, kuten tutkimuksessa [50]. Lisäksi on-off mittauksia on hyödynnetty avaruustutkimusta koskevissa kokeissa, esimerkiksi tutkimuksessa [3]. Tässä opinnäytetyössä tehdään päästömittauksia, joissa hyödynnetään osassa mittauksia on-off mittauksia. Myös päästömittauksissa on aikaisemmissa tutkimuksissa käytetty on-off-mittauksia, kuten tutkimuksessa Sandipta et al. A Novel, Compact Optical Device for Estimating the Methane Emissions in Geological Environment [49]. Yleensä on-off mittauksissa toistetaan on-off sykliä useita kertoja mittauksen aikana. Tässä opinnäytetyössä toistoa ei kuitenkaan tehty opinnäytetyön moninaisten tavoitteiden, sumutuksessa ilmenneiden vikojen, puutteellisten resurssien ja nopeasti vaihtelevien sääolosuhteiden vuoksi.

Koko saran pituisella jahtausmittauksella ilman on-off-mittausta haluttiin dataa turpeen



Kuva 4.2. Mittausten käytännön toteutus. Kuvaan on merkitty eri laitteiden paikat suhteessa toisiinsa mittauksissa. Ainoastaan mittauslaitteen ja lähteen paikat muuttuivat merkittävästi suhteessa toisiinsa eri mittauksissa ja mittauksien aikana, koska mittauslaitteen paikkaa muutettiin tuulen nopeuden mukaan.

keruusta aiheutuvasta pölyämisestä pitkällä aikavälillä. Näissä mittauksissa oli myös helppompi havaita itse vedensumutuslaitteiston käyttöön liittyviä ongelmia. On-off-mittausten tarkoitus oli mitata yksityiskohtaisempaa dataa korkeapainepumpun vesisumun pölynsidontatehosta, mutta myös muuta mitattua dataa käytettiin pölynsidontatehon määrittämisessä, koska onnistuneita on-off mittauksia tehtiin vain neljä.

Lähes kaikki mittaukset kuvattiin joko droonilla, matkapuhelimen kameralla tai videokameralla. Osaa mittauksista ei kuvattu teknisten ongelmien vuoksi. Mittauksissa testattiin myös vedenpehmentimen vaikutusta pölynsidontaan. Vedenpehmentintä lisättiin tiettyihin mittauksiin sumutettavaan veteen. Mittauksissa kuitenkin muut tekijät vaikuttivat niin voimakkaasti tuloksiin, että vedenpehmentimen vaikutusta mittaustuloksiin ei havaittu, eikä sen käyttöä myöskään dokumentoitu.

Turpeen myöhemmän kosteuden määrittämiseksi jokaiselta mittaussarjalta kerättiin turvenäyte saran alusta, keskeltä ja lopusta. Mikäli sara oli niin pitkä, että siitä tehtiin kaksi erillistä mittausta, otettiin molemmille mittauksille omat turvenäytteet kummankin mittausten aloituspaikasta, keskeltä ja lopetuspaikasta.

4.4.3 Mekaaniseen kokoojavaunuun pölymittauksia varten suunnitellut ja toteutetut muutokset

Tässä alikappaleessa kerrotaan muutoksista, joita suunniteltiin tai toteutettiin opinnäytetyön pölymittauksiin. Muutosten tarkoitus oli sekä vähentää mekaanisen kokoojavaunun pölyämistä ilman vesisumun vaikutusta että tehostaa vesisumun pölynsidontatehoa. Erityisesti haluttiin rajoittaa keruuvaunussa kohtien pölyämistä, joihin ei kesän mittauksen aikana pystytty vaikuttamaan vesisumun avulla. Oltiin myös havaittu, että vesisumu ei sido tarpeeksi tehokkaasti pölyhiukkasia vaikutusalueellaan Hanhinevan erityisen pölyävällä kentällä, koska hiukkasat kulkeutuvat nopeasti ympäröivään ilmaan vesisumun tehokkaan vaikutustilavuuden ulkopuolelle. Lisäksi vesisumu saattoi jopa työntää hiukka-

sia pois pölynsidontatilavuudesta aiheuttamansa ilmapvirtauksen vuoksi. Lisää tietoa sumutussuuttimien epätoivotuista ilman liikutusominaisuuksista löytyy alikappaleesta 3.1.3. Mekaaninen kokoojavaunu mittauksissa oli mallia JMK-55V.

Kerrotaan ensin pölyämistä vähentävistä suunnitelmista, joita ei opinnäytetyön pölymittauksiin mennessä ehditty toteuttamaan. Vaunuun oli kuluneen kesän 2018 aikana silmämääräisen havainnoinnin pohjalta suunniteltu parannuksia pölyämisen vähentämistä ajatellen. Näistä yksi oli keruusäiliön pölyämiskohtien tiivistäminen. Osa vaunun pölypäästöistä muodostuu säiliön raoista pois virtaavan ilman vuoksi. Erityisesti tyhjennysluukkujen ja säiliön kiinteiden osien välistä emittoituu pölyä ympäristöön. Tähän ei kuitenkaan keksitty ratkaisua, joka olisi kestänyt työn aikaista kovaa räsitusta, eikä olisi vaatinut kohtuuttomasti ylläpitoa. Keruusäiliön traktorin puoleisessa yläosassa on avoin poistoilmaa varten suunniteltu luukku, jonka ansiosta paine keruusäiliössä ei turpeen keruun aikana kasva liian suureksi. Luukun kautta pääsee pölyä ulkoilmaan, varsinkin kun keruusäiliössä on keruun aikana paljon turvetta. Tätä varten luukun eteen suunniteltiin asennettavaksi kumiläppä, joka rajoittaa pölyn liikettä säiliöstä ulos, mutta päästää silti ilman virtaamaan ulos lähes esteettä. Näitä suunnitelmia ei kuitenkaan ehditty pölymittauksiin mennessä toteuttamaan.

Mittauksia varten kuljettimen päälle asennettiin kevytpeite. Kuljettimeen hitsattiin sopivin välimatkoin metallipalkkeja, jotka nostivat kevytpeitteen kuljettimessa muodostuvan pölypilven päälle. Tämä tehosti vesisumutuksen keräysten aikaista pölynsidontatehoa. Peite esti painevesisumua työntämästä turvepölyhiukkasia pois tehollisesta pölynsidontatilavuudesta samalla luoden alleen turbulentteja virtauksia, mikä tehosti entisestään pölynsidontaa. Alikappaleen 4.4.2 kuvassa 4.2 näkyy kevytpeite asennettuna nostohihnan yläpuolelle. Tulevaisuudessa kevytpeitteen toimintaa voidaan tehostaa lisäämällä sen peittämää tilavuutta ja kaarevuutta, sekä asentamalla ja uudelleen suuntaamalla sumutussuuttimia eri tavoin.

4.4.4 Pölymittausten suorittaminen

Turpeen keruun pölymittaukset tehtiin kolmena perättäisenä päivänä Sompanevan turvetuotantoalueella sijaitsevalla Hanhinevalla 20-22.8.2018. Kuvassa 4.3 esitetään kartta mittausalueesta ja eritellään mittauspäivien mittaukset. Mittaukset 1-3 tehtiin ensimmäisenä mittauspäivänä, mittaukset 4-12 tehtiin toisena mittauspäivänä ja mittaukset 13-18 tehtiin kolmantena mittauspäivänä.

Ensimmäisenä mittauspäivänä 20.8.2018 tehdyissä mittauksissa vesisumutus ei toiminut kunnolla ja sen käyttöpaine oli vain muutamia baareja. Tämän vuoksi sekä mittaus 1 että 2, joissa vesisumu oli käytössä, jätettiin huomiotta tuloksista. Mittauksessa 3 vesisumua ei käytetty. Mittauksen aikana kerätyn suodatinnäytteen massapitoisuus 171 mg/m^3 oli kuitenkin erittäin korkea suhteessa mitattuun SICK-hiukkasmittarin mittaamaan sähkösignaalikeskiarvoon. Tämä saattoi johtua siitä, että mittalaitteen mitattavissa oleva suurin

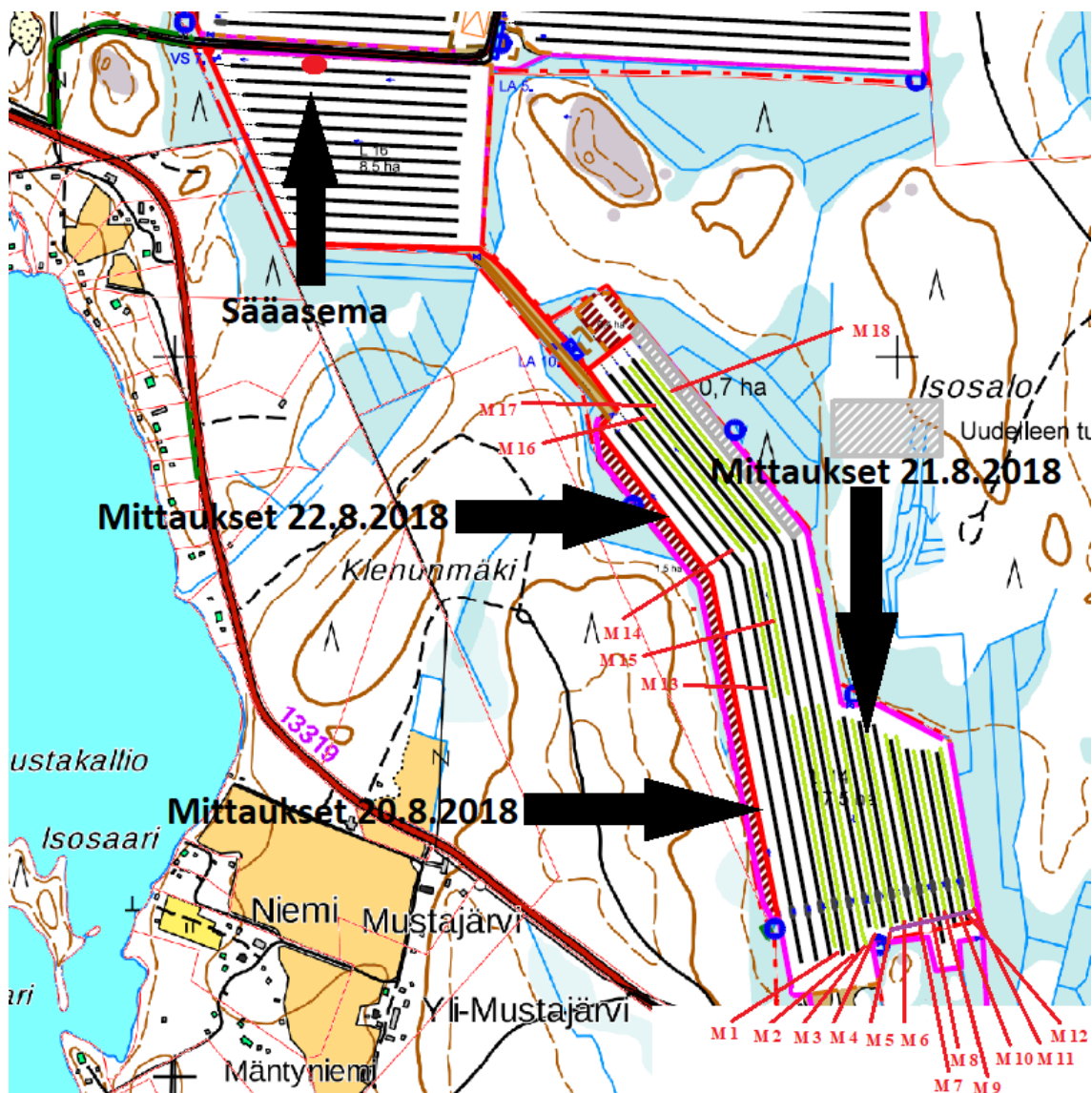
massapitoisuus on 200 mg/m^3 , jolloin sen mittausvaste saturoitui moninkertaisen sironnan vuoksi. Tästä ilmiöstä kerrotaan enemmän kappaleessa 4.2. Joka tapauksessa mittauksen data poikkesi huomattavasti seuraavien mittauspäivien datasta, joten se jätettiin pois mittaustuloksien laskennasta. Jahtausetäisyyden ollessa vain 5 metriä mittaustulosta ei katsottu vertailukelpoiseksi mittauspäivien 2 ja 3 tulosten kanssa, joten myöskään mittausten pelkkää sähkösignaalidataa ei tulosten laskemisessa huomioitu. Tulleviin mittauksiin jahtausetäisyyttä nostettiin 20.8.2018 käytetystä viidestä metristä noin 7–10 metriin. Mittaukset kuvattiin matkapuhelimen videokameralla.

Mittausten jälkeen vesisumutuslaitteistoon tehtiin korjauksia. Painepumppun ja vesisäiliön välisestä letkusta löytyi tukos, joka poistettiin. Sumutussuuttimien epäpuhtaudet poistettiin paineilmalla. Lisäksi sumutussuutinelementteihin johtavien letkujen päästä löytyi liitoskohtia, joista osassa oli todella pieni virtausaukko. Pienet virtausaukot porattiin suuremmiksi.

Toisena mittauspäivänä 21.8.2018 vesisumutus toimi halutulla tavalla. Veden käyttöpainneeksi asetettiin 37 bar. Lisäksi tuuli mittausalueella pysyi melko stabiilina, eli mittauksen aikana tuulen suunta ja -nopeus eivät merkittävästi muuttuneet lukuun ottamatta mittausta 8 ja 12. Käsitellään tämän päivän mittauksen osalta vain mittausta, joissa tapahtui jotain suunnitelmista poikkeavaa. Mittauksessa 6 painepumppun tiiviste vuoti ja veden sumutuspaine aleni huomattavasti. Tämä huomattiin kesken mittauksen ja pumpun koteloä kiristettiin, mutta vuoto jatkui. Vuoto korjattiin seuraavaan mittaukseen mennessä. Mittaus 6 otettiin kuitenkin kokonaan pois mittaustulosten käsittelystä, koska vesisumutus ei sen aikana toiminut oikealla tavalla. Mittauksen kuvauksista mittaukset 4 ja 5 kuvattiin droonilla, mutta mittauksen 5 aikana drooni lakkasi toimimasta. Tämän jälkeen mittauksen 5 loppuosa, sekä mittaukset 6, 7 ja 8 kuvattiin matkapuhelimen kameralla. Mittaukset 9, 10, 11 ja 12 kuvattiin videokameralla. Videokameraan tuli kuitenkin teknisiä ongelmia, jonka vuoksi vain mittauksista 9 ja 10 kuvattiin osa ja mittausta 11 ja 12 ei saatu videotallennetta.

Mittauksessa 9 tuuli puhalsi koko mittauksen ajan suuntiin, johon oli vaikea saada pölynmittauslaitteistoa oikea-aikaisesti. Tämän vuoksi mittaus 9 otettiin huomioon vain massapitoisuusmittauksen ja sähkösignaalidatan yhteensovittamisessa, mutta sitä ei otettu mukaan pölynsidontatehoa koskeviin laskelmiin. Mittauksen 12 aikana suurin osa pölypitoisuudesta lensi tuotantoalueen reunalta suoraan metsään, joten sitä ei juurikaan pystytty mittaamaan. Mittauksen aikana mitattiin jahtausmittauksessa pelkkää sähkösignaalidataa, eli massapitoisuusmittausta ei ollut käytössä. Tämän vuoksi mittaus 12 jätettiin kokonaan pois mittaustulosten käsittelystä. Mittauksissa 5, 11 ja 12 kokeiltiin myös vesisumutuksen on-off mittausta, mutta suurin osa mittauksista tehtiin ilman asetusten vaihtamista kesken mittauksen, jotta saatiin mahdollisimman paljon dataa pölyämisestä normaalin ajon aikana.

Kolmantena mittauspäivänä 22.8.2018 vesisumutus toimi halutulla tavalla, veden käyttöpainneeksi asetettiin aluksi 37 bar ja kahteen viimeiseen vesisumulliseen mittaukseen käyttöpainneeksi asetettiin 75 bar ja jahtausetäisyyttä nostettiin 13 metriin haastavien sää-



Kuva 4.3. Kuvassa esitetään opinnäytetyön pölymittausten mittauspaikat. M on lyhenne mittauksesta, esimerkiksi M1 tarkoittaa mittausta 1. Mittausta vastaava sara on merkitty vihreällä viivalla, paitsi M12 on merkitty violetilla viivalla, koska sen mittausreitti kulki poikittain muiden reittien suuntaan nähden aivan niiden aloituskohtien lähellä.

olosuhteiden vuoksi. Mittaus- ja vesisumutuslaitteisto toimivat halutulla tavalla kaikkien mittausten ajan. Tuulen suunta ja nopeus vaihtelivat kuitenkin erittäin voimakkaasti, joten mittauksissa oli paljon hetkiä, jolloin mitattava pölypilvi ei osunut mittalaitteeseen. Pölyämisen huomattiin silmämääräisesti, mittausdatasta ja videotallenteiden perusteella olevan voimakkaampaa kolmantena mittauspäivänä kuin toisena mittauspäivänä. Videotallenteet kuvattiin kaikissa mittauksissa matkapuhelimen kameralla.

Mittauksista parhaiten onnistui mittausta 16, jonka aikana tuuli puhalsi lähes koko mittauksen ajan takaviistoon vaunun etenemissuuntaan nähden ja mittalaitte pysyi suurimman osan ajasta pölypilven sisällä. Myöskin viimeisissä mittauksissa 17 ja 18 pölypilvi osui hyvin mittalaitteeseen on-off mittauksissa, koska nämä mittaukset ajoitettiin tarkoituksella kohtiin, joissa tuuliolosuhteet pysyivät melko stabiileina. Muuten on-off mittauksia ei

viimeisenä mittauspäivänä tehty, koska tuulen suunta vaihteli jopa muutaman 10 sekunnin välein ja yleensä noin minuutin välein, jolloin olosuhteet eivät olisi vakiintuneet tarpeeksi luotettavien tulosten saamiseksi. Mittauksessa 18 suodatinnäytteestä määritetty pölyn massapitoisuus oli todella suuri verrattuna mitattuun virtasignaaliin, joten mitaustulos otettiin pois massapitoisuusmittausten ja sähkövirtadatan yhteensovittamista koskevista laskelmista.

4.4.5 Mittaustulosten käsittely

Pölymittauksissa saatiin dataa neljästä mittalaitteesta: optisesta mittalaitteesta SICK FW-101 Dust Concentration Monitor, Zambellin Easy PLUS suodatinkeräyksestä sekä sen oheen asennetusta lämpötila-anturista ja Davis Vantage Pro2 langattomasta sääasemasta. Lisäksi mittaukset videokuvattiin. Videot tallennettiin mittauspäivien jälkeen pilvipalveluun. Koska mittausdataa kertyi paljon, ei sitä esitellä tässä kappaleessa, vaan se löytyy liitteestä A.

SICK FW101 Dust Concentration Monitorin mitaama data ja lämpöanturidata ladattiin Excel-tiedostoon. Zambellin Easy PLUS suodatinkeräyksessä mitatun hiukkasmassan käsittelyn teki Rambollin ilmanlaatuysikkö ja näistä lasketut ilman pölyn massapitoisuudet lisättiin SICK-mittausdatan oheen mittauskohtaisesti. Sääaseman mitaama data tallentui dataloggeriin, josta se ladattiin tekstitiedostona tietokoneelle.

Kaikki edellä mainittu data yhdistettiin Matlab-laskentaohjelmalla. Saadut suodatinnäytteet yhdistettiin niihin liittyviin SICK mittalaitemittauksiin ja sääaseman minuuttiresoluution datasta leikattiin mittausaikoja vastaava data ja se skaalattiin monistamalla ja yhdistettiin vastaavien ajanjaksojen SICK mittalaitedataan, jonka resoluutio oli 5 sekuntia.

Koska SICK:llä mitattua dataa ei oltu ennen mittauksia vaihtelevan turvelaadun ja ajoittain käytetyn vesisumutuksen vuoksi asetettu vastaamaan massapitoisuusarvoja, se tehtiin tulosten laskennan yhteydessä alikappaleen 4.4.6 kertomalla tavalla. Vesisumun ollessa mittauksessa käytössä SICK:in virtasignaaliavaste oli mitatulle pölymassapitoisuudelle erilainen kuin vesisumun ollessa mittauksen aikana pois päältä. Tämän vuoksi käyttötapauksien vesisumu käytössä/pois käytöstä datoilte tehtiin omat sovitteet kummallekin erikseen. Sovitekäyräksi valittiin ensimmäisen asteen polynomiyhtälö, koska mitatut pisteet selkeästi sopivat sen muotoiselle käyrälle parhaiten ja Matlabin soviteen hyvyttä kuvaavat parametrit, kuten keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) ja virheestä johtuvien neliöiden summa (SSE) antoivat hyvät tulokset tälle soviteelle. Sovitteita käyttäen SICK:in kaikki mittapisteet asetettiin vastaamaan soviteesta arvioituja massapitoisuuksia. Sovitteesta laskettiin myös virherajat pölyämislle. SICK:in käyttöohjekirjassa [52] laitteen kalibrointiin käytetään toisen asteen polynomiyhtälöä, mutta toisen asteen termi on ilmeisesti tarkoitettu moninkertaiselle sironnalle.

Pölynsidontateho määritetään seuraavasti:

$$f_p = \frac{\rho_{off} - \rho_{on}}{\rho_{off}} \times 100\%, \quad (4.1)$$

missä ρ_{on} on mitatun pölyn massapitoisuus ilmassa vesisumutuksen aikana ja ρ_{off} on mitatun pölyn massapitoisuus ilmassa, kun vesisumutus on pois käytöstä.

Pölynsidontatehon kaava 4.1 sijoitettiin keskivirheen kasaantumislaista johdettuun todennäköisen maksimivirheen kaavaan, joka löytyy Tampereen teknillisen yliopiston Fysiikan työt I-kurssin oppilasmonisteesta [31]. Tämän avulla määritettiin virherajat lasketuille pölynsidontatehoille.

Kaikki mittaukset eivät onnistuneet halutulla tavalla. Koska mittausdataa oli kuitenkin melko vähän, myös vain osittain onnistuneiden mittausten dataa käytettiin riippuen asioista, jotka mittauksissa onnistuivat tai epäonnistuivat. Mittaustuloksien laskennassa vaillinaisten mittausten käyttöä rajoitettiin kolmella eri tavalla:

1. Mittaus poistettiin kokonaan tulosten laskennasta.
2. Mittauksen dataa käytettiin vain soviteen muodostamisessa, jossa SICK:n sähkövirtasignaali data asetettiin vastaamaan tiettyjä pölyn massapitoisuuden arvoja. Muusta laskennasta mittaus jätettiin pois.
3. Mittausta ei otettu huomioon edellä esitettyssä soviteen muodostamisessa, mutta SICK-hiukkasmittarin sähkövirtasignaali dataa käytettiin muiden tulosten laskemisessa.

Ensimmäisenä mainittu karsinta tehtiin, mikäli mitattu data ei ollut mittauksen toteutuksen tai olosuhteiden vuoksi vertailukelpoinen muun mitatun datan kanssa tai mittausdata oli muuten epävalidia. Toisena mainittu rajoitus tehtiin, jos mittauksessa suurimman osan ajasta pölypilvi ei osunut mittalaitteeseen. Tällöin ei saatu edustavaa dataa pölypilven todellisesta massapitoisuutta, jos mittalaite olisi ollut koko mittauksen ajan pölypilvessä, mutta mittaustulosta voitiin kuitenkin käyttää soviteen muodostamisessa. Kolmas rajoitus datan käyttöön tehtiin, mikäli suodatinnäytteestä mitattu massapitoisuus ja sen aikana mitattu sähkövirtadatan keskiarvo poikkesivat huomattavasti muista vastaavista laskentatuloksista. Jos kuitenkin videomateriaalin ja SICK-sähkövirtadatan perusteella mittausdatassa ei huomattu mitään epänormaalia, oletettiin, että virtasignaali datan mittauksessa ei ollut tapahtunut häiriöitä. Suodatinnäytteen mittauksessa taas mitatun massan arvo saattoi sisältää suurenkin virheen, jos mittauksen aikana kerätty massa oli pieni esimerkiksi pienen ilmassa leijuvan pölyn massapitoisuuden vuoksi. Tällöin virtasignaali data otettiin käyttöön mittaustulosten laskennassa, mutta mittauksen dataa ei käytetty soviteen muodostamisessa, koska kerätty suodatinnäyte ei todennäköisesti ollut edustava.

Koska mittausvideoiden perusteella pölypilvi ei kaikkien mittausten aikana aina osunut lähellekään mittalaitteistoa, jätettiin kaksi mittausta pois pölynsidontatehon laskennasta. Näitä olivat mittaus 9 ja 12. Mittausta 9 käytettiin kuitenkin soviteen laskemisessa, kos-

ka mitattu massapitoisuus ja sitä vastaava mitattu sähkövirtasignaalin keskiarvo ovat keskenään vertailukelpoisia, vaikka mittalaite ei ollutkaan jatkuvasti altistuneena pölypilvellen. Mittauksessa 12 ei mitattu pölyn massapitoisuutta, joten tätä mittausta ei voitu hyödyntää sovitteen laskemisessa. Pölypilvi ei myöskään osunut juurikaan mittauslaitteistoon, joten mittausta 12 ei käytetty muuallakaan tulosten laskennassa. Mittauksissa 1 ja 2 oli ongelmia vesisumun käytössä, joten niitä ei otettu mukaan pölynsidontatehon määrittämiseen eikä sovitteen laskemiseen. Mittauksessa 6 vesisumun käytössä ilmeni myös ongelmia, mutta koska mittausvideoiden ja muistiinpanojen perusteella ongelmakohta pystyttiin rajaamaan pois, mittausta pystyttiin käyttämään normaalisti tulosten laskennassa. Mittaus 3 ja 18 onnistuivat mutta ne jätettiin pois sovitteen laskemisesta, koska mitatut massapitoisuudet suhteessa mitattuihin virtasignaaleihin olivat todella suuria ja poikkesivat huomattavasti muista mittauksista saaduista mittaus tuloksista. Mittausta 3 ei käytetty myöskään muussa tulosten laskennassa, koska jahtausetäisyys oli huomattavasti pienempi kuin päivien 21-22.8.2018 mittauksissa. Mittauksen 18 mitattua sähkösignaalia käytettiin tulosten laskennassa, koska datakäyrässä (liitteessä A kuva A.3) ei ollut mitään normaalista poikkeavaa ja mittaus onnistui videomateriaalin perusteella hyvin. Yksityiskohtaisempaa tietoa mittauksen suorittamisesta löytyy alikappaleesta 4.4.4.

Mittauksen alusta ja lopusta leikattiin datasta aina pois 30 sekunnin osuus. Tämä johtui siitä, että mittauksen alussa mittalaitteita ei saatu aina heti pölypilveen. Mittauksen alussa ja lopussa saattoi myös ilmetä vaunun ollessa paikallaankin ylimääräistä pölyämistä, jota ei haluta ottaa mukaan tarkasteluun, koska tarkoituksena on arvioida normaalin keruun aikaisia pölypäästöjä. Mittauspäivänä 22.8.2018 dataa olisi voitu leikata myös mittauksen keskeltä vaihtelevan tuulen suunnan vuoksi, mutta videomateriaalista ei kaikissa mittauksissa pystytty tarkasti tulkitsemaan hetkiä, jolloin mittauslaitteisto on pölypilvessä. Tämän vuoksi mittausdataa ei voitu leikata yllä mainitulla tavalla.

Mittauksien aikana tehtiin myös on-off mittauksia, eli otettiin vesisumu joko käyttöön tai pois käytöstä kesken mittauksen. Näissä mittauksissa pölynsidontatehon laskemiseen käytettiin dataa, joka oli mitattu 5 – 60 sekuntia ennen ja jälkeen vesisumun asetuksen vaihtamista. Vesisumun asetuksen vaihtamiseen arvioitiin kestävän alle kymmenen sekuntia. Ympäristön olosuhteiden ja keruuvaunun täyttöasteen ei havaittu on-off mittauksissa muutaman minuutin pituisilla aikajaksoilla muuttuvan merkittävästi, minkä vuoksi sekä on että off asetuksen pölyämistä dataa käytettiin yllämainitusti kahden minuutin ajanjaksolta.

Mittauspaikan taustapitoisuudeksi oletettiin massapitoisuus, joka vallitsi kentällä mittauksen välisinä ajanhetkinä. Mittalaitteen signaali täysin puhtaalle ilmalle oli 4 mA, kun taas kentällä mittauksen välissä laitteen mittaama signaali oli 4,06 – 4,09 mA keskiarvon ollessa 4,08 mA. Koska taustapitoisuus vaikutti hieman mittaus tuloksiin, sen keskiarvo otettiin laskennassa huomioon vähentämällä mittausdatasta lasketuista massapitoisuuksista taustapitoisuuden virtasignaalin keskiarvoa vastaava massapitoisuus.

Kentältä poimituista turvenäytteistä määritettiin turpeen kosteusprosentti. Osasta turvenäytteistä tutkittiin myös turpeen tuhkapitoisuus. Turvenäytteiden kosteusprosentit mää-

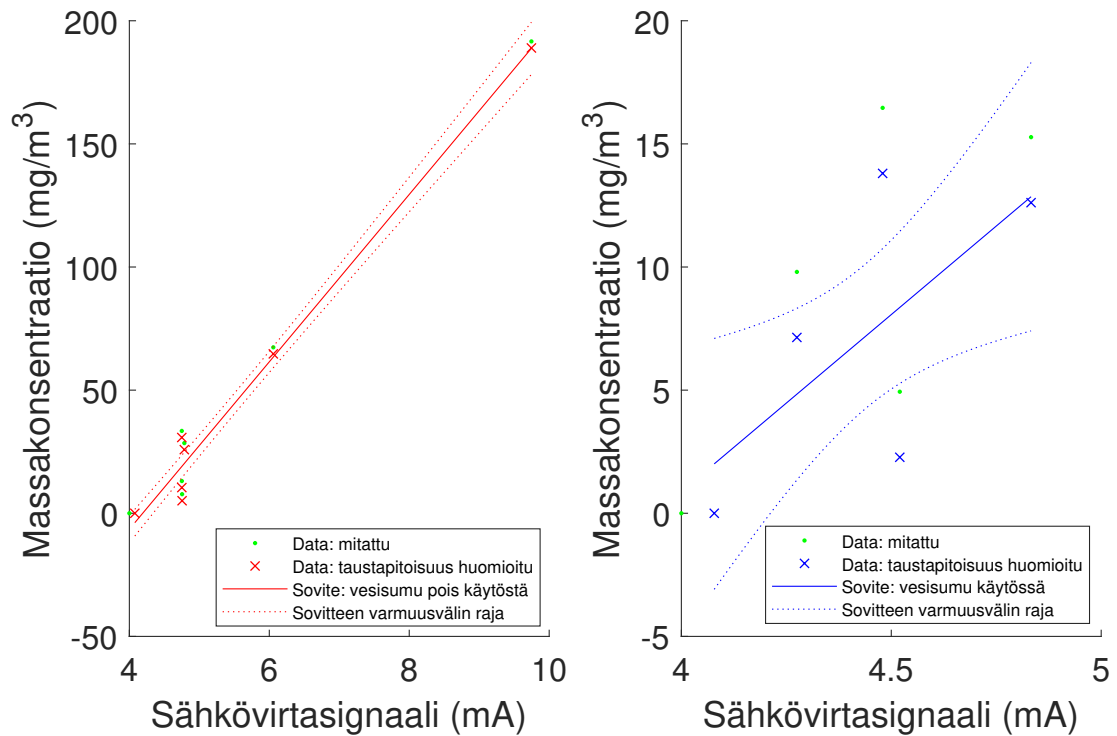
ritettiin Vapon Aitonevan toimipisteestä löytyvällä kosteusprosentin pikamäärittäjällä. Siihen punnittiin pieni määrä turvetta ja laite laski automaattisesti kuivauksen yhteydessä turpeen kosteusprosentin. Tuhkapitoisuuden määrittämisessä käytettiin Vapon Haukinevan toimipisteestä löytyvää tuhkausuunia. Tuhkanäytteen määrittämisessä käytettiin Vapon ohjeistusta. Siinä punnittu näyte asetettiin tuhkausuuniin ja tuhkattiin korkeassa lämpötilassa. Tämän jälkeen astiaan jäänyt tuhka punnittiin ja laskettiin tuhkapitoisuus vertaamalla tuhkatun ja alkuperäisen tuhkaamattoman näytteen massaa toisiinsa.

4.4.6 Datojen sovittaminen sekä taustapitoisuuden ja vesisumun huomioiminen mittausten jälkeen

Tässä alikappaleessa esitetään arvio, jossa mittauspäivinä 21 – 22.8.2018 kerätyn datan avulla SICK-hiukkaslaskurin sähkösignaalidata asetettiin vastaamaan mittausten turvepölyn massapitoisuutta sovitteen avulla. Arviossa käytetty data ja siitä piirretyt sovitteet löytyvät kuvasta 4.4. Seuraavaksi kerrotaan, kuinka sovitteet tehtiin ja mitkä asiat niihin vaikuttivat.

Koska turpeen laatu vaihtelee tuotantoalueittain ja saroittain, ei SICK-mittalaitteen sähkösignaalien arvoja voitu asettaa vastaamaan mitään tiettyjä massapitoisuuksia ennen mittauksia. SICK:n mittausvaste turpeen pölyämislle oli hyvin erilainen vesisumun ollessa käytössä keruun aikana verrattuna mittauksiin, joissa vesisumu oli pois käytöstä. Tämä johtui vesisumun aiheuttamasta sironnasta mittalaitteella. Ennen pölymittauksia tehdyissä mittauksissa tutkittiin SICK-mittauslaitteen sirontasignaalia pelkälle vesisumulle ja todettiin, että signaali on hieman pienempi kuin turvepölyn aiheuttama signaali, mutta kuitenkin merkittävä, jolloin vesisumun vaikutusta pölymittauksissa ei voitu jättää huomioimatta. Usean mittauksen aikana kerättiin samanaikaisesti sekä suodatinnäyte pölypilvestä että mitattiin SICK:illä pölypilven aiheuttamaa sirontaa. Dataa, joka kerättiin vesisumun ollessa käytössä, käsiteltiin erikseen datasta, jonka mittauksen aikana vesisumu oli pois käytöstä, jolloin muodostettiin kummallekin datajoukolle sovitteet. Sovitteiden avulla pystyttiin suhteuttamaan SICK:n mittaama sähkövirtasignaali mittausten aikaisiin pölypäästöihin. Sovitteiden muodostamisesta lisää kerrotaan kuvassa 4.4

Mittauspäivien aikana kentällä oli myös pieni mutta mittaustuloksiin vaikuttava taustapitoisuus, joka vaikutti mittaustuloksiin. Taustapitoisuudeksi oletettiin ajankohdat, jolloin kentällä ei ollut toimintaa ja SICK:in sähkövirtadata oli tasoittunut. Koska mittauspäivän 20.8.2018 mittausdataa ei otettu mukaan laskentaan, tarkasteltiin vain päivien 21–22.8.2018 taustapitoisuutta. Mittauspäivänä 21.8.2018 SICK mittasi taustapitoisuuden, joka vaihteli sähkövirtadatakäyrässä välillä 4,07 – 4,09 mA. Mittauspäivänä 22.8.2018 vastaava arvo vaihteli välillä 4,06 – 4,09 mA. Kummankin päivän yhteiseksi taustapitoisuuden keskiarvoksi laskettiin 4,076 mA. Tätä tulosta käytettiin laskiessa taustapitoisuuden vaikutus kuhunkin mittaukseen. Taustapitoisuuden aikariippuvuus jätettiin huomiotta, koska vaihtelu oli hyvin pientä.



Kuva 4.4. Vasemman puoleisessa kuvaajassa esitetään sovite, joka on piirretty käyttäen taulukoiden A.2 ja A.4 dataa mittausten osalta, joiden aikana vesisumu oli pois käytöstä. Vastaavasti oikean puoleisessa kuvaajassa esitetään sovite, joka on piirretty käyttäen samoja taulukoita datan osalta, jota mitatessa vesisumu oli käytössä. Sovitteet on laskettu ja piirretty taustapitoisuuden datalle, jossa taustapitoisuus on huomioitu (rasti). Kuvaajiin on piirretty myös alkuperäinen mittausdata (piste). Yksittäisen datapisteen massapitoisuus vastaa tietyn mittauksen aikana suodattimella kerätystä turvepölystä laskettua massapitoisuutta ja datapisteen sähkövirtasignaali vastaa saman mittauksen aikana mitattua keskimääräistä sähkövirtasignaalia. Alkuperäiseen dataan, jossa taustapitoisuutta ei huomioitu lisättiin myös SICK-hiukkaslaskuriin asetettu nollavirtasignaali 4 mA ja sitä vastaavaksi massapitoisuudeksi 0 mg/m^3 . Taustapitoisuuden huomioivaan dataan lisättiin taustapitoisuuden keskiarvoistettu sähkövirtasignaali ja sitä vastaavaksi massapitoisuudeksi 0 mg/m^3 . Sovitteen varmuusraja rajaavat sovitteen varmuusvälin 70 %:n todennäköisyydellä.

Alkuperäisten mittauksien aikana mitattujen suodatinnäytteiden massapitoisuuksien ja niitä vastaavien SICK-sähkövirtasignaalien avulla laskettiin ja piirrettiin sovitteet dataan. Sovitteiksi valittiin ensimmäisen asteen polynomit.

Seuraavien alikappaleiden 4.4.7 ja 4.4.8 pölyämisen laskennassa käytetyt virherajat määritettiin kuvan 4.4 sovitteiden virherajojen avulla. Mikäli laskennalliselle sähkövirtasignaaliarvolle tulosten laskennassa ei löytynyt sovitteesta virherajoja, kyseiselle arvolle ei määritetty rajoja ollenkaan.

Mittauksissa vesisumua ei erikseen mitattu eikä sitä myöskään poistettu tai vähennetty mittausten aikana näytteestä. Vesisumun vaikutus mittaustulokseen otettiin huomioon edellä mainituin keinoin laskemalla jälkikäteen datoille, joissa vesisumu oli käytössä ja pois käytöstä, erilliset sovitteet. Koska suodatinnäytteet kuivattiin ennen punnitusta, ei vesisumu vaikuttanut laskettuun pölyn massapitoisuuteen.

Vesisumu mittausvideoiden mukaan keräsi mitattua pölypilveä tiheämmäksi, kun taas ilman vesisumua pöly dispersoitui laajemmalle alueelle, jolloin laskennalliset pölynsidontatehot olivat todennäköisesti pienemmät, mitä ne olisivat olleet, jos tämä ilmiö olisi otettu huomioon. Koska paikallinen lämpötila aleni vesisumun osuessa mittalaitteistoon, olisi datan pohjalta voitu tehdä arvio, jossa lämpötilan alenema liitetään mitatun pölyn massapitoisuuden kasvuun. Tämä olisi kuitenkin ollut haastavaa, koska paikalliseen lämpötilaan vaikuttivat myös muut tekijät, kuten kärryssä mittauslaitteiden takana kuumaa ilmaa tuottava aggregaatti. Tällöin lämpötilan alenema saattoi johtua myös ajonopeudesta, eli mitä kovempaa ajettiin, sitä vähemmän aggregaatti lämmitti mittausilmaa. Koska mittauksissa oli myös muita todennäköisesti suurempia epävarmuustekijöitä, kuten tuulen suunta, täyttöaste, keruusäiliön sisäinen paine ja turpeen laatu, ei vesisumun aiheuttamaa lämpötilan alenemaa ja sen vaikutusta mittaustulokseen käsitelty tämän tarkemmin.

4.4.7 Päiväkohtainen pölyäminen ja pölynsidontateho

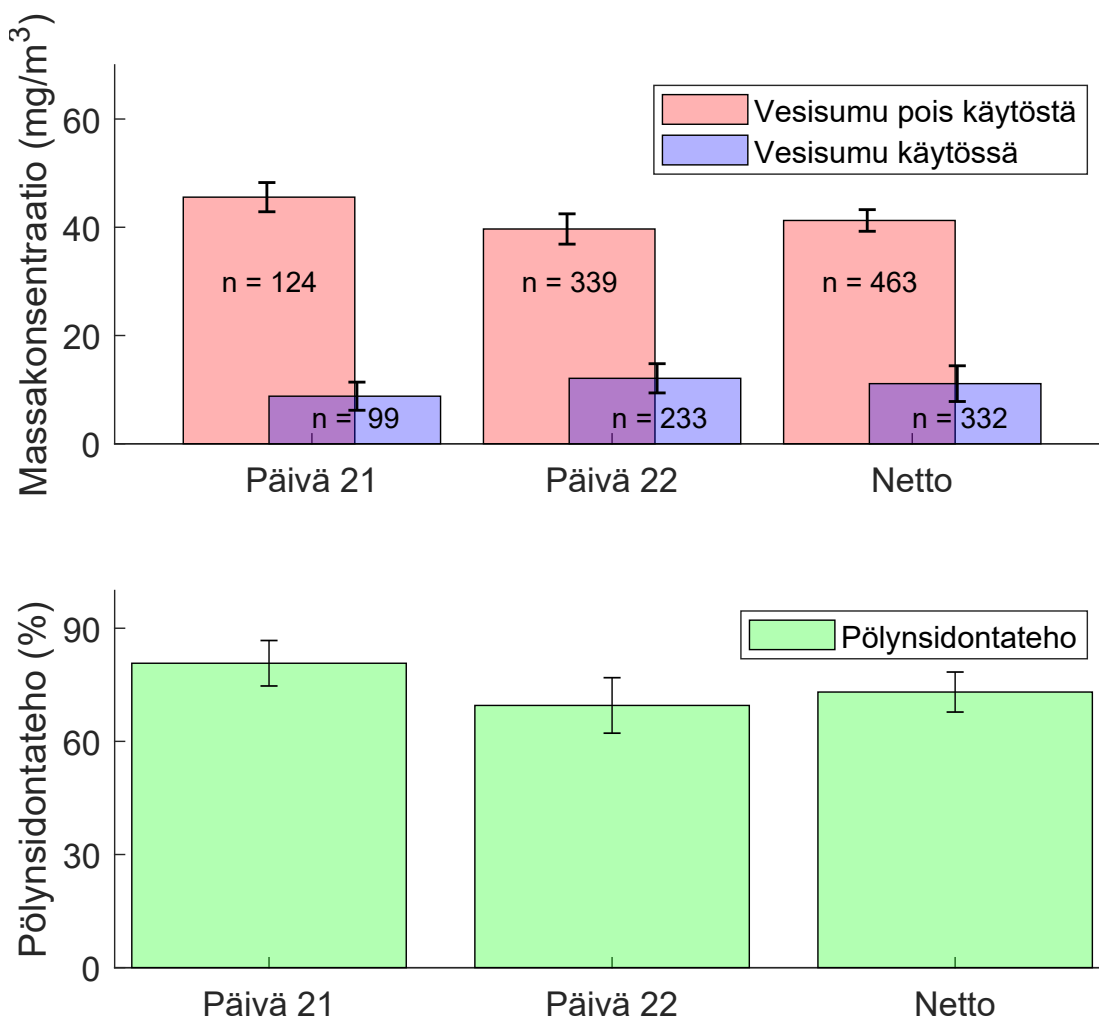
Kuviin 4.5 ja 4.6 on piirretty pölymittausten tulokset sekä päivittäisinä keskiarvoina että kaikkien mittausten kokonaiskeskiarvoina.

Kuvan 4.5 mittaustulosten laskentaan on otettu mukaan vain mittausten osat, jotka ilmenevät liitteen kuvista A.2 ja A.3 sinisellä ja punaisella viivalla maalattuna. Kuvassa 4.6 on laskettu pölynsidontateho on-off mittauksista. Mittaustulosten tarkasteluun hyväksytyjä on-off mittauksia tehtiin mittauksissa 5, 11, 17 ja 18. Myös mittauksessa 12 tehtiin on-off mittaus, mutta se hylättiin huonojen sääolosuhteiden vuoksi. Kumpaankin mittaustapaan valikoituneen datan kriteereistä lisää tietoa löytyy alikappaleesta 4.4.5. Tulosten laskentaan valikoitunut sähkövirtasignaali data muunnettiin massapitoisuusdataksi käyttämällä alikappaleessa 4.4.6 kuvassa 4.4 esitettyjä sovitteita.

Kuvan 4.5 mittaustulokset antavat hyvän kuvan mittauspäivien pölyämisestä ja korkeapainepumppun pölynsidontatehosta kokonaisuudessaan ja tulokset vastaavat mittausten aikana tehtyjä silmämääräisiä havaintoja. Yleensä vesisumun ollessa käytössä pölyämistä ei juurikaan havaittu. Toisaalta joissakin tilanteissa vesisumu ei merkittävästi vähentänyt pölyämistä. Näitä tilanteita ja niiden syitä kartoitetaan ja tutkitaan alikappaleessa 4.4.8

Kuvan 4.6 on-off-mittausten pölyämisen massapitoisuudet ja pölynsidontatehot ovat satumanvaraisempia kuvattaessa pidemmän ajan pölynsidontatuloksia, kuin kuvassa 4.5 käytetystä mittausdatasta muodostetut vastaavat arvot, koska ensin mainittujen laskennassa käytettiin huomattavasti vähemmän dataa. Ne kuitenkin antavat erilaisen näkökulman pölyämis- ja pölynsidontatuloksiin, koska pölynsidontatulokset on laskettu reaaliaikaisia pölyämisen massapitoisuuksia vertailemalla, kun vesisumu otettiin käyttöön tai pois käytöstä kesken ajon.

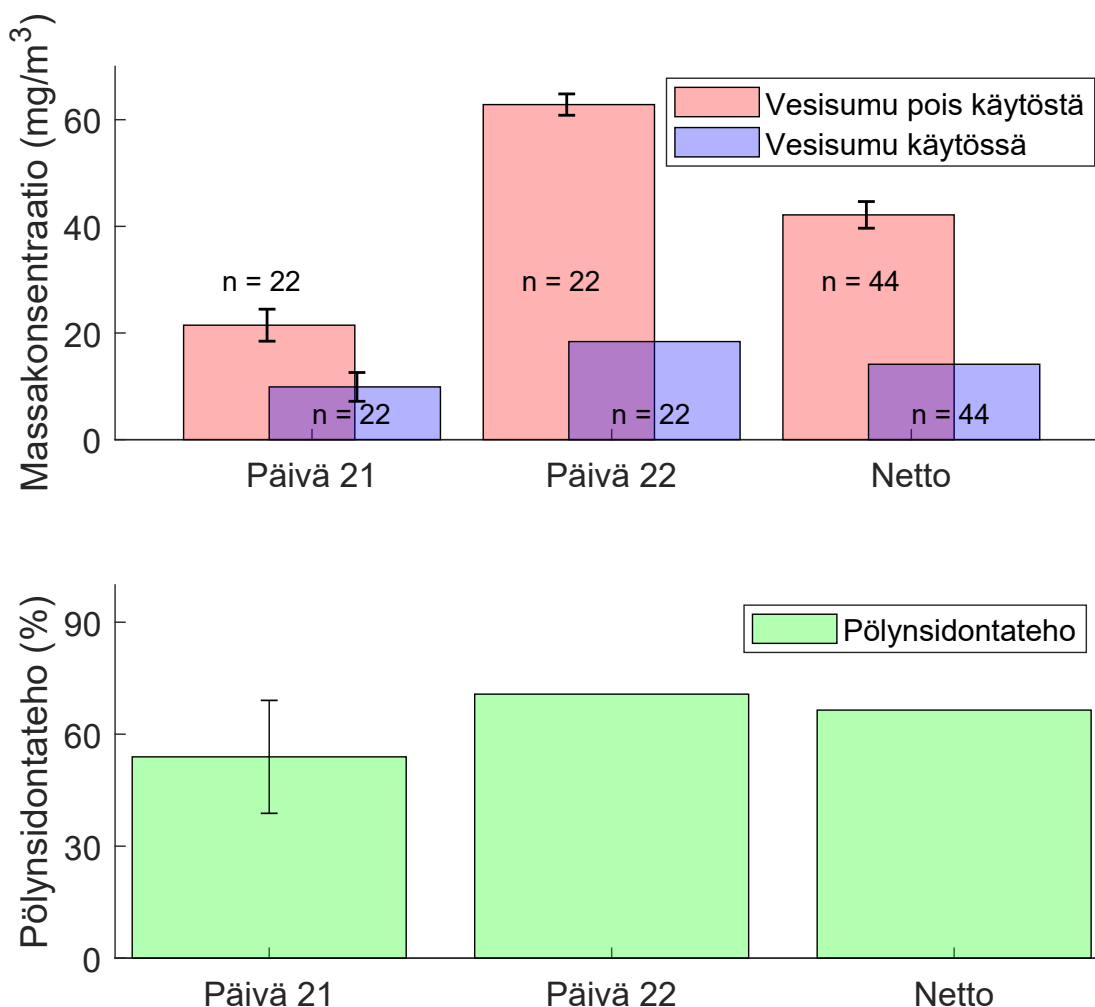
Kuvan 4.5 tuloksien laskentaan on käytetty dataa, joka on mitattu eri aikajaksoina toisin, kuin kuvan 4.6 tuloksien laskennassa. Näin ollen myös ympäristön ja mittausten muuttu-



Kuva 4.5. Kuvassa on esitetty kaikesta validista mittausdatasta laskettu pölyäminen ja pölynsidontateho. Datan validoinnista tarkemmin kerrotaan tässä alikappaleessa sekä alikappaleessa 4.4.5. Merkintä *n* tarkoittaa tuloksen laskennassa käytettyjen datapisteiden määrää.

vien tekijöiden vaikutus laskettuihin tuloksiin kuvassa 4.5 on tuntematon virhetekijä, jonka vaikutus voi olla erittäin merkittävä. Molempien kuvien pölynsidontatulokset ovat virherajojen puitteissa lähellä toisiaan. Tulosten yhdenmukaisuus ei poista kokonaan ympäristön ja mittauksen muuttuvien tekijöiden tuomaa epävarmuustekijää, mutta yhtäläisyyksien vuoksi lasketut tulokset vahvistavat toinen toisiaan, koska kahdella eri menetelmällä on päädytty suunnilleen samoihin tuloksiin.

Kuvassa 4.5 päivän 21.8.2018 keskimääräinen pölynsidontateho oli korkeampi kuin päivän 22.8.2018. Tämä saattoi johtua siitä, että jälkimmäisenä päivänä tuuliolosuhteet olivat haastavat ja suurempi osa pölyämisestä ei osunut mittalaitteisiin mittausten aikana, jolloin runsas pölyäminen aliarvioitiin mittauksissa. Silmäämääräisesti tarkasteltuna pölyäminen oli absoluuttisesti suurempaa jälkimmäisenä mittauspäivänä, vaikka tämä ei näy kuvasta 4.5, todennäköisesti yllä mainittujen haasteellisten mittaolosuhteiden vuoksi. Väitettä tukevat myös on-off-mittauksen tulokset, joiden mukaan jälkimmäisenä mittauspäivänä pölyäminen oli huomattavasti suurempaa kuin edeltäneenä mittauspäivänä. On-



Kuva 4.6. Kuvassa on esitetty pölyäminen ja pölynsidontateho on-off mittauksissa. Datan valikoitumisesta tarkemmin kerrotaan tässä alikappaleessa sekä alikappaleessa 4.4.5. Pölyämisen virherajat on laskettu kuvan 4.4 sovitteen avulla ja pölynsidontatehon kuvaajan virherajat on laskettu käyttäen pölyämisen virherajoja. Kaikkiin palkkeihin ei laskettu virherajoja ollenkaan, koska massapitoisuuksien keskiarvot ylittivät sovitteen laskentaratat. Merkintä *n* tarkoittaa tuloksen laskennassa käytettyjen datapisteiden määrää.

off-mittaukset ajoitettiin niin, että suurin osa pölypilvestä suuntautui mittauslaitteelle. Kuvassa 4.6 pölynsidontatehojen tulokset menevät päiväkohtaisesti eritavoin, eli ensimmäisenä päivänä pölynsidontateho on pienempi kuin jälkimmäisenä päivänä. Koska molempina päivinä on-off mittauksia tehtiin vain kaksi kappaletta, ovat niiden tulokset melko sattuman varaisia kokonaiskuvan selvittämisen kannalta. Kuitenkin tietyn mittauksen pölynsidontatehoa nämä tulokset kuvaavat luultavasti paremmin kuin tulokset, jotka saatiin ilman on-off-mittauksia. Mikäli on-off-mittauksia olisi tehty enemmän, olisi sumutuslaitteiston pölynhallintaominaisuuksista saatu tarkempaa tietoa.

4.4.8 Pölyäminen ja pölynsidontateho täyttöasteittain

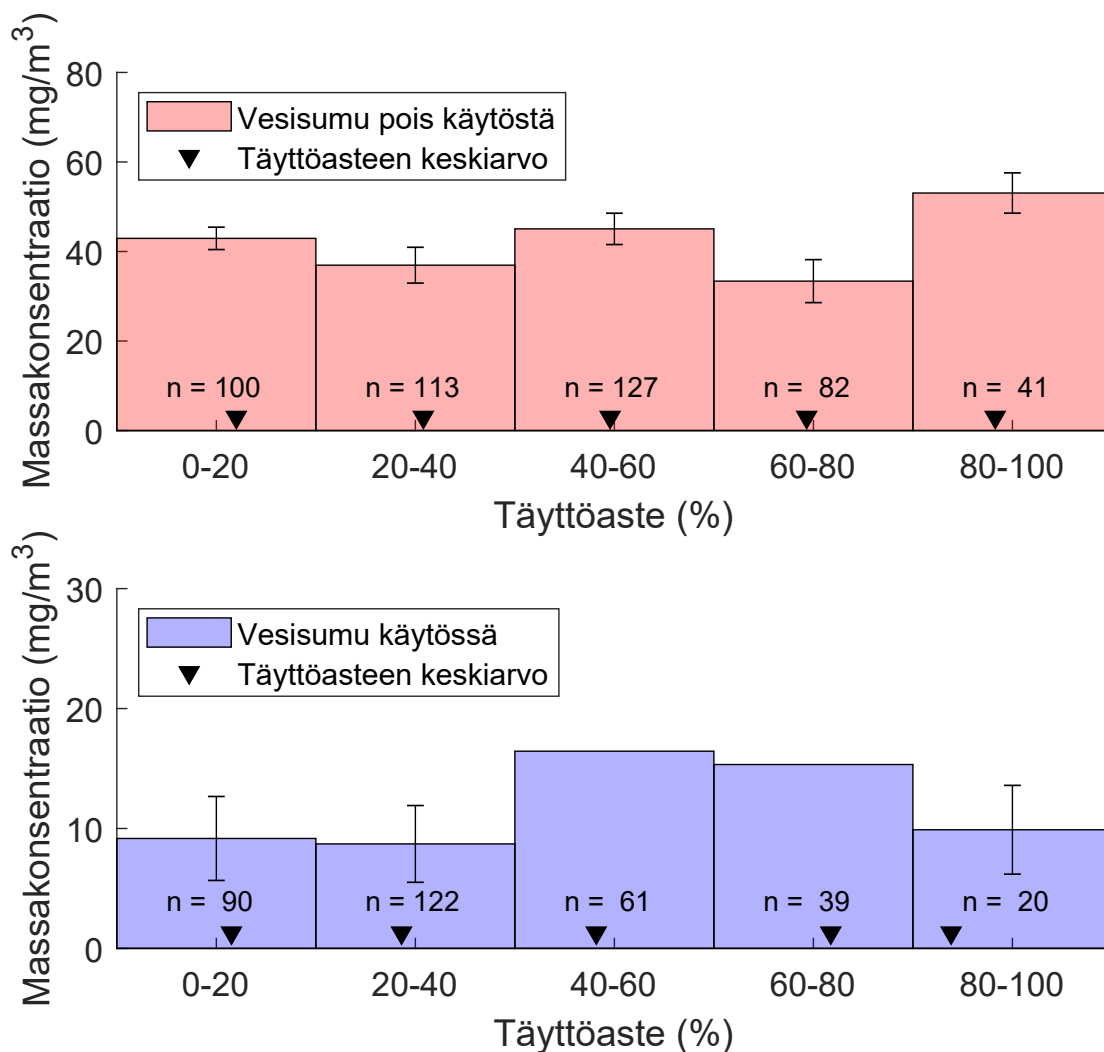
Tässä alikappaleessa pohditaan kokoojavaunun keruusäiliön täyttöasteen vaikutusta pölyämiseen ja pölynsidontatehoon, koska useimpien mittausten sähkösignaalin datakäyritä havaittiin mitattujen arvojen keskimäärin kasvavan mittauksen edetessä. Kuvissa 4.7 ja 4.8 on esitetty turpeen keruun aikaisen mekaanisen kokoojavaunun keruusäiliön täyttöasteen vaikutus pölyämiseen ja vesisumutuksen pölynsidontatehoon.

Seuraavaksi kerrotaan, miten SICK-mittalaitteen mittauspisteiden määrään avulla arvioitiin mekaanisen kokoojavaunun täyttöastetta. Tämän alikappaleen mekaanisen kokoojavaunun keruusäiliön täyttöasteet on arvioitu kentällä tehtyjen mittausten mittauspisteiden lukumäärän n perusteella. Jokainen mittaus kesti tietyn ajan ja koska SICK-mittalaite antoi joka mittauksessa yhden mittauspisteen 5 sekunnin välein mittaukseen kulunut aika oli aina jokin viiden sekunnin monikerta ja johdettavissa mittauksen aikana mitattujen mittauspisteiden määrästä. Kaikkien mittausten mittausaikojen oletettiin olevan suoraan verrannollisia kerätyn turpeen määrään, koska vaunun keruunopeus pysyi mittauksesta toiseen lähes samana ja turpeen keruu tapahtui muutoinkin joka mittauksessa samalla tavalla.

Mittauksien 7 ja 8 välillä mekaanisen kokoojavaunun keruusäiliötä ei tyhjennetty, jolloin säiliö kerättiin lähes täyteen. Tällöin SICK-hiukkasmittarilla mitattujen datapisteiden määrä oli $n = 124$. Näiden mittausten aikana kerätty turve täytti keruusäiliön lähes kokonaan, jolloin mittauksessa 8 keruusäiliön täyttöasteeksi lopussa oletettiin laskentaa varten olevan 100%. Kun mittaus 7 aloitettiin mekaanisen kokoojavaunun keruusäiliön ollessa tyhjä, täyttöasteeksi oletettiin tällöin 0%. Kaikki muut täyttöasteet mittausten välillä skaalattiin lineaarisesti mittausajankohdan mukaan viiden sekunnin välein. Edellä kerrotun arvion avulla asetettiin täyttöasteet myös muille mittauksille samalla periaatteella. Kaikki muut mittaukset ja mittausparit olivat ajallisesti lyhyempiä kuin mittauspari 7,8.

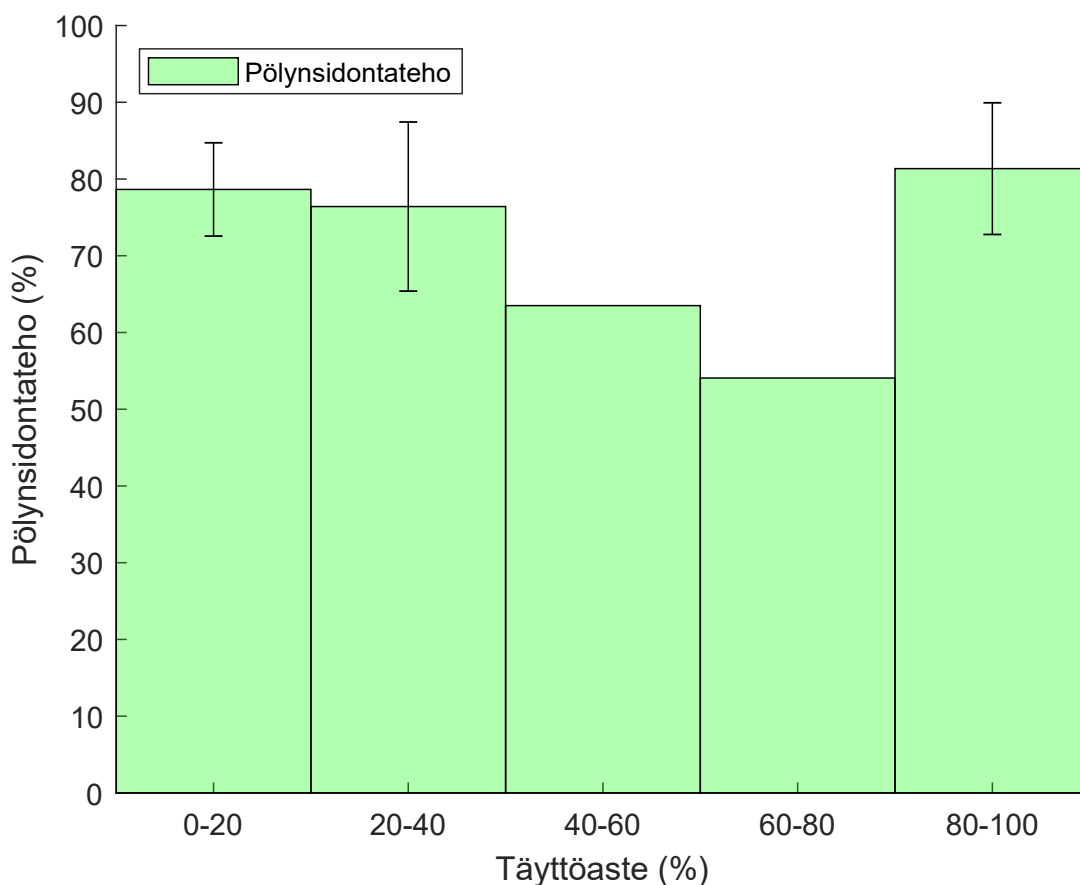
SICK-hiukkaslaskurin data jaoteltiin mittaushetken täyttöasteen perusteella täyttöastevälisiin 0 – 20%, 20 – 40%, 40 – 60%, 60 – 80% ja 80 – 100%. Näille väleille jaoteltiin kaikki SICK-hiukkasmittarilla mitattu sähkövirtadata. Data jaoteltiin niin, että jokainen sähkövir-tasignaalin datapiste päättyi välille, joka vastasi keruuvaunun säiliön täyttöastetta, joka datapisteen mittaushetkellä oli vallinnut.

Pölyäminen laskettiin jokaiselle täyttöastevälille valikoituneen sähkövirtadatan kesiarvolle alikappaleessa 4.4.6 esitettyjen datasovitteiden avulla. Laskuissa käsiteltiin erikseen data, jonka mittaamisen aikana vesisumu oli käytössä sekä data, jonka mittaamisen aikana vesisumu oli pois käytöstä. Pölynsidontateho jokaiselle täyttöastevälille laskettiin vertaamalla täyttöastevälittäin keskimääräistä pölyn massapitoisuutta, kun vesisumu oli pois käytöstä ja käytössä. Mittausdatan täyttöasteiden keskiarvot täyttöastevälillä eivät olleet samat vesisumun ollessa käytössä ja pois käytöstä. Koska vastaavat täyttöastevälit erosivat hyvin vähän toisistaan, ne olivat kuitenkin keskenään suoraan vertailukelpoiset ja jokaiselle täyttöastevälille voitiin laskea pölynsidontateho.



Kuva 4.7. Mekaanisen kokoojavaunun pölyäminen turpeen keruun aikana täyttöasteen funktiona sekä vesisumun ollessa pois käytöstä että vesisumun ollessa käytössä. Kunkin täyttöasteen pylvään alaosaan kirjattu "n" tarkoittaa mitattujen mittauspisteiden lukumäärää kyseisellä täyttöasteella. Mittauspiste tarkoittaa SICK-hiukkasmittarilla viiden sekunnin aikana mitattua keskiarvoistettua sirontadatapistettua. Kunkin täyttöasteen välillä sisältyvän datan täyttöasteiden laskennallinen keskiarvo ei ole yhtä suuri, kuin täyttöasteen välillä geometrisen keskikohta, mutta suurimmassa osassa datajoukkojen keskiarvot ovat hyvin lähellä geometrista keskikohtaa. Laskennalliset keskiarvot on kuvattu mustalla kolmiolla. Virherajat laskettiin kuvasta 4.4 löytyvien sovitteiden virherajoja käyttäen. Kaikkiin palkkeihin ei laskettu virherajoja, koska massapitoisuuksien keskiarvot ylittivät sovitteen laskentatarajan.

Pölyämisen ja täyttöasteen välillä ei näy selkeää kasvavaa verrannollisuutta, kuten ennakkoon arvioitiin. Kuitenkin liitteen mittausdatasta kuvista A.1, A.2 ja A.3 nähdään, että lähes jokaisessa mittauksessa pölyäminen keskimäärin lisääntyy mittausajan kasvaessa. Täyttöasteen lisäksi muut tekijät siis vaikuttivat merkittävästi pölyämiseen, jonka vuoksi täyttöasteen vahvaa vaikutusta pölyämiseen ei kuvasta 4.7 havaita. Täyttöasteen lisäksi merkittävä mittausajankohdasta riippuva pölyämistä lisäävä tekijä oli todennäköisesti keruusäiliössä keruun aikana kasvava paine. Kun turvetta kerättiin keruuvaunun säiliöön, sen sisällä ilmanpaine kasvoi. Koska keruuvaunun seinät ovat saumoista väljiä, täyttö-



Kuva 4.8. Mekaanisen kokoojavaunuun asennetun korkeapainepumpun vesisumutuksen pölynsidontateho vaunun keruusäiliön täyttöasteen funktiona. Virherajat laskettiin kuvan 4.7 virherajoja käyttäen.

asteen ollessa tarpeeksi suuri, kasvava vaunun sisäinen ilmanpaine pakotti suuremman määrän pölyä ulkoilmaan seinien välisistä raoista ja aukoista. Kun mekaaninen kokoojavaunu pysäytettiin ajoittain mittauksen aikana tai kahden perättäisen mittauksen välillä, paine laski hetkellisesti ja kun keruuta jatkettiin, paine kerääntyi taas hiljalleen uudelleen säiliöön.

Perättäisillä mittauksilla tarkoitetaan mittauksia, joissa vaunun keruusäiliötä ei tyhjennetty mittausten välissä. Esimerkiksi perättäisissä mittauksissa 7 ja 8 sekä 9 ja 10 pölyäminen ei automaattisesti ollut jälkimmäisten mittausten alussa samalla tasolla, kuin ensimmäisten mittausten lopussa, vaan pölyäminen kasvoi ensimmäisten mittauksen tasolle tietys-
sä ajassa. Pölyäminen kasvoi myös absoluuttisesti suuremmaksi, kuin ensimmäisissä mittauksissa.

Kuvasta 4.8 nähdään, että kaikilla muilla täyttöasteväleillä paitsi 80 – 100% täyttöasteväleillä pölynsidontateho pienenee täyttöasteen kasvaessa. Tämä viittaa siihen, että pölyäminen kasvaa täyttöasteen kasvaessa lähteistä, joihin vesisumun pölynsidonnalla ei ole vaikutusta. Tällaisia lähteitä ovat esimerkiksi yllä mainitut keruusäiliön epätiivit raot seinämien saumakohdissa. Täyttöasteväleillä 80 – 100% pölynsidontateho jälleen kasvoi. Tämä tulos saattaa johtua datan sattumanvaraisuudesta, koska tältä väliltä mitattiin vä-

hiten dataa. Toisaalta, kun vaunun keruusäiliö oli lähes täynnä, pölyämistä saattoi tapahtua paljon vaunun takapään yläosan aukosta, jonka kautta hihna työnsi kerätyn turpeen säiliöön. Kun täyttöaste oli korkea, kerätyn turpeen pinta oli lähellä aukkoa, jolloin pölyä saattoi nousta aukosta vaunun takaosan ulkoilmaan. Takaosassa sijaitsi myös pölynhallintajärjestelmän vesisumutus, jolloin suuri osa pölystä sitoutui vesipisaroihin sumutuksen ollessa käytössä. Mittausvideoista tätä arviota ei voida kuitenkaan yksiselitteisesti päätellä, joten korkea pölynsidontateho suurilla täyttöasteilla voi johtua myös muista tekijöistä.

4.4.9 Tulosten tarkastelu ja luotettavuuden arviointi

Mittausten tarkoitus oli pölyämisen osalta saada suuntaa-antavaa informaatiota mekaanisen kokoojavaunun pölyämisestä ja siihen asennetun korkeapainevesisumutuksen pölynhallinnasta turpeen keruun yhteydessä. Laskennalliset tulokset vastasivat hyvin mitausten aikana tehtyjä silmämääräisiä havaintoja ja mittausvideoista tehtyjä havaintoja. Ennen datankäsittelyn ja laskelmien aloittamista mitausten jälkeen 31.8.2018 Mustajärven läheisyydessä pidetyssä Vapo Oy:n yleisötilaisuudessa pelkkien mitausten aikana tehtyjen havaintojen perusteella esitettiin arvio, jonka mukaan pölynsidontateho oli suurimmassa osassa mittauksia 70 – 90 %, mutta tietyissä tapauksissa se laski alle 50 %:n. Kaikesta laskentaan valikoituneesta datasta laskettuna pölynsidontateho oli mittauspäivien 21–22.8.2018 aikana $73 \pm 10\%$.

Kuljettimen päälle asennetun kevytpeitteen huomattiin mitausten aikana tehostaneen pölynhallintaa. Tällöin vesisumu muodosti kuljettimen päälle asennetun kevytpeitteen kanssa pölynsidonnan kannalta tehokkaan systeemin, jossa kevytpeitteen alle muodostuvat vesisumua sisältävät liikkuvat ilmamassat yhdessä kevytpeitteen märän pinnan kanssa keräsivät ja laskeuttivat runsaasti pölyä mekaanisen kokoojavaunun lähimaastoon.

Silmämääräisten havaintojen ja mittausvideoiden mukaan vähiten pölynsidontaa ilmastata tapahtui, kun tuuli puhalsi voimakkaasti kohtisuoraan keruuhihnalle, jolloin pölyä irtosi nostohihnalta runsaasti. Tuulen nopeuden vaikutusta pölyämiseen ja pölynsidontatehoon ei tarkastella tässä opinnäytetyössä mittausdatan pohjalta, koska mittaukset eivät olleet sen osalta tarpeeksi tarkkoja eikä selkeää yhteyttä tuulen nopeuden ja pölyämisen välillä havaittu. Datasta huomattiin kuitenkin, että tuulen ollessa voimakasta (yli 6 m/s) tai puhaltaessa keruuvaunun takasektorista etusektoriin mitattu virtasignaali oli poikkeuksellisen pieni verrattuna muilla tuulen suunnilla ja tuulen nopeuksilla tehtyihin mittauksiin. Näissä olosuhteissa pölyämisen ei kuitenkaan pitäisi olla mitenkään erityisen pientä, vaan jopa päin vastoin lisätä pölyämistä, kuten yllä kuvattiin. Mittalaitteen pieni signaali johtui todennäköisesti mitaustekniikan puutteellisuudesta, koska mönkijällä kuljetettavaa mitauslaitteistoa oli vaikeaa kuljettaa nopean ja nopeasti muuttuvan tuulen mukaan, jolloin pölyämistä ei pystytty mittaamaan tarkasti. Mönkijää ei myöskään ajettu vaunun etusektoriin, koska sieltä olisi tuulen suunnan vaihtuessa takasektoriin ollut hidasta ajaa mönkijä takaisin takasektorin pölypilveen, jonne tuulen suunta suurimman osan mittausajasta puhalsi. Sen vuoksi tuulen puhaltaessa pitkään etusektoriin, mitattu virtasignaali mitat-

tiin yleensä vahvasti laimentuneesta näytteestä. Myöskin, kun tuuli oli voimakas, näyte saattoi laimentua huomattavasti, koska tutkimuksen [27] mukaan tuulen nopeuden kasvu pienentää mitatun hiukkasmassan pitoisuutta turvepölymittauksissa.

Taulukkoon 4.1 on kerätty datapisteiden määrät, joiden mittauksen aikana tuuliolosuhteet olivat haastavat. Siitä nähdään, että mittauspäivänä 21.8.2018 noin puolet mittausajasta, jossa vesisumu oli käytössä, tapahtui voimakkaassa tuulella. Kaikesta mittauksien tarkasteluun hyväksytystä datasta alikappaleessa 4.4.7 sekä mittauspäivien aikana tehdyssä silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin, että ensimmäisenä mittauspäivänä 21.8.2018 pölynsidontateho oli suurempaa kuin mittauspäivänä 22.8.2018. Tämä saattoi johtua osaltaan siitä, että voimakas tuuli dispersoi pölypilveä ennen mittalaitetta mittauksissa, joissa vesisumu oli käytössä, minkä vuoksi pölypilven alkuperäinen massapitoisuus aliarvioitiin sekä mittalaitteella että silmämääräisesti laimentuneen näytteen vuoksi. Myös merkittävä osa 22.8.2018 päivän mittauksista tapahtui haastavissa olosuhteissa, mikä aiheutti epävarmuutta mittauksien luotettavuuteen. Erityisesti tällöin tuulen suunta muuttui nopeaan tahtiin, mikä osaltaan vaikutti tulosten epävarmuuteen.

Mittausvideoista havaittiin, että kylmä vesisumu kerää pölypilven hiukkasia tiiviimmäksi pilveksi. Kun vesisumua ei ollut käytössä mittauksen aikana pölypilvi dispersoitui ympäristöönsä voimakkaammin. Tämän vuoksi mittausdata keskimäärin esittää pölyämisen vesisumun ollessa päällä hieman suurempana kuin se todellisuudessa oli. Mittauskorkeus oli mittauksissa noin 1,5 metriä, eli dataa ei pystytty mittaamaan pölypitoisuuksista, jotka kohosivat emittoituaan tätä korkeammalle. Koska esimerkiksi vaunun yläosista pölyäminen oli voimakasta ja kyseinen pöly kohosi yleensä yläilmoihin, ei tämän tyyppisestä pölyämisestä saatu mittausdataa. Näin ollen pölyämisen laskentatuloksissa luultavasti pienet hiukkaset olivat aliedustettuja ja suuret hiukkaset yliedustettuja.

Keruusäiliön täyttöasteen kasvaessa suurimmassa osassa mittauksia vesisumutuksen pölynsidontateho heikkeni. Tämä saattoi johtua keruusäiliön epätiiviyistä rakenteista, jolloin pölyä pääsi säiliön rakenteiden välistä ulkoilmaan vesisumutuksen ulottumattomiin. Toisaalta virherajojen puitteissa pölynsidontateho pysyi täyttöasteittain lähes samana, joten täyttöasteella ei välttämättä ollut suurta vaikutusta pölynsidontatehoon näissä mittauksissa. Pelkän täyttöasteen ei havaittu myöskään vaikuttavan vahvasti mitatun pölyn määrään, joten pölyämisen kasvun mittausajan funktiona arvioitiin johtuvan täyttöasteen ja vaunun säiliössä mittauksen aikana kasvavan paineen yhteisvaikutuksesta. Tämä on todennäköinen syy pölyämisen kasvulle mittausajan edetessä, koska mekaanisen kokoojavaunun suljetun säiliön tiedettiin Vapo Oy:llä jo ennestään keräävän painetta. Säiliön pölyämiseen voi paineen ja täyttöasteen lisäksi vaikuttaa myös turpeen kosteusprosentti, koostumus ja tuhkapitoisuus, mutta mittauksissa otettujen kosteus- ja tuhkanäytteiden perusteella näiden tekijöiden ei huomattu merkittävästi vaikuttavan pölyämiseen mittauksissa. Turpeen mitattu kosteusprosentti ei myöskään systemaattisesti kasvanut mittauksen alkupaikasta loppupaikkaan.

Mittauksien virherajat on muodostettu mittalaittevirheen perusteella käyttäen alikappaleen 4.4.6 kuvassa 4.4 esitettyjä SICK-mittalaitteen ja hiukkasten massa- perustu-

Taulukko 4.1. Mittauspisteiden määrät, joissa mittauksen aikana tuulen nopeus oli 6 m/s tai enemmän sekä mittauspisteiden määrät, joissa mittauksen aikana tuuli puhalsi keruvaunun etusektoriin

Mittauspäivä		21.8.2018		22.8.2018	
Vesisumu on/off		On	Off	On	Off
Tuulen nopeus > 6 m/s	Mittauspisteiden määrä (n)	50	16	0	12
Tuulen suunta vaunun etusektoriin	Mittauspisteiden määrä (n)	0	0	92	72

van suodatinkeruunäytteen datojen välille laskettua sovitteita. Mittaustulosten luotettavuuden kannalta ongelmallisinta on, että virhettä mittauksissa aiheuttivat myös mittausmekaniikka ja muuttuva ympäristö, kuten edellä huomattiin. Mittaustekniikan osalta virhettä aiheutui, edellä mainittujen huomioiden lisäksi, koska mittauksen aikana mittauslaitteiston paikka suhteessa muodostuneeseen pölypilven muuttui jatkuvasti. Vaikka paikka pyrittiin pitämään aina pölypilven konsentroituimmassa kohdassa vakioetäisyydellä lähteestä, saattoi pölypilvi muuttaa nopeasti paikkaansa, jolloin dataa ei pystytty jatkuvasti mittaamaan pölypilven konsentroituneimmasta kohdasta. Etäisyys ei myöskään pysynyt vakiona ja sitä jouduttiin muuttamaan mittauksen välillä sääolosuhteiden ja pölypilven liikkeen mukaan. Tämä virhe olisi voitu minimoida tekemällä enemmän on-off-mittauksia ja mittaamalla hiilidioksidin laimennossuhde mittauksen aikana. On-off-mittauksista lisää tietoa löytyy alikappaleesta 4.4.2 ja hiilidioksidin laimennossuhteen käytöstä pölymittauksissa tietoa löytyy kappaleesta 5.2.

Opinnäytetyön mittauksissa tehtiin yhteensä neljä on-off-mittausta, joiden datasta pölynsidontatehon laskettiin olleen $70 \pm 11\%$. Koska on-off mittauksen tulokset ovat hyvin linjassa kaikesta mittausdatasta lasketun pölynsidontatehon, silmämääräisten havaintojen ja mittausvideoilta tehtyjen havaintojen kanssa, laskennalliset tulokset mittauspäivien pölynsidontateholla alikappaleessa 4.4.7 ovat edellä mainituista epätarkkuustekijöistä huolimatta luotettavia suuntaa-antavalla tarkkuudella. Tuloksista voidaan päätellä, että pölynhallintajärjestelmän vesisumun pölynsidonta toimii mutta, jos identtiset mittaukset tehtäisiin uudestaan erilaisissa sääolosuhteissa, tulokset saattaisivat vaihdella myös mittalaitteen virherajojen ulkopuolella. Koska kahdella eri tekniikalla saavutettiin kuitenkin lähes samat tulokset, todennäköisesti mittaustulokset kuvaavat ainakin karkealla tarkkuudella järjestelmän pölynhallintaa. Myös alikappaleen 4.4.8 tulokset antavat suuntaa-antavan kokonaiskuvan pölyämisestä ja pölynsidonnasta.

5 LAITTEISTOJEN JA MENETELMIEN ARVIOINTI SEKÄ PARANNUSEHDOTUKSET

Tässä luvussa arvioidaan laitteistojen ja menetelmien toimivuutta mittausten aikana sekä tehdään parannusehdotuksia, joita mittauslaitteistoihin ja -menetelmiin sekä pölynsidon-tajärjestelmään ja mekaaniseen kokoojavaunuun kannattaa tai olisi kannattanut tehdä. Koska suuri osa parannusehdotuksista pohjautuu käytännön havaintoihin, kerrotaan niistä kappaleessa 5.1. Kappaleessa 5.2 kerrotaan mittauksissa käytettyjen mittalaitteiden ja mittaustekniikoiden toimivuudesta opinnäytetyön mittauksissa. Lisäksi perehdytään mittaustulosten ja -tekniikoiden puutteisiin ja tehdään niihin parannusehdotuksia. Kappaleeseen 5.3 on koostettu parannusehdotuksia opinnäytetyön tavoitteiden mukaisesti pölyämisen hallintaan, korkeapainepumpun vedenkulutuksen optimointiin ja laitteiston toimintaan ja kestävyysliikkeen liittyen.

5.1 Käytännön havainnot

Käytännön havainnot mittausten aikana tehtiin niin mittausympäristöstä, mekaanisesta kokoojavaunusta ja sen pölyämisestä sekä mittauslaitteistosta. Mittaustulosten yleistettävyyden kannalta huomionarvoista on, että jokaisen keruuvaunun pölyäminen on yksilöllistä, eivätkä tämän opinnäytetyön mittaustulokset ole suoraan yleistettävissä kaikkiin keruuvaunuihin. Opinnäytetyön mekaanisen kokoojavaunun yksi erityispiirteistä pölyämisen suhteen oli, että vaunun tyhjennysluukkujen ja seinien välisistä saumoista ja yläosan seinämien aukoista vapautui keruun aikana huomattava määrä pölyä ympäristöön. Tämä johtui luultavasti siitä, että vaunu oli ennen mittauksia ainakin kerran kaatunut, mikä oli aiheuttanut vaunuun mekaanisia vaurioita. Tämän vuoksi kyseisen vaunun pölyäminen keruun aikana oli suurempaa, kuin vastaavan uuden vaunun. Myös kerätty turve oli normaalia keräyskosteutta alhaisemman kosteusprosenttinsa ja korkean maatuneisuusasteensa vuoksi normaalia pölyävämpää. Näin ollen mittaustulosten pölyäminen ei vastaa normaalien olosuhteiden pölyämistä, mutta korkea pölyämisaste oli eduksi opinnäytetyön pölyämistutkimuksen toteuttamisen kannalta.

Mittauspäivänä 22.8.2018 SICK-datan mittaaminen oli haastavampaa kuin sitä edeltäneenä mittauspäivänä 21.8.2018, koska tuulensuunta muuttui usein mittausten aikana. Tällöin, kun mönkijällä lähdettiin ajamaan kohti muuttuneeseen tuulen suuntaan liikkuvaa pölypilveä, pölypilveen saatettiin päästä hetkeksi, jonka jälkeen tuulensuunta taas vaihtui.

Tämän jälkeen jouduttiin taas ajamaan uuteen paikkaan pölypilven perässä. Näiden siirtymien ajalta mitattiin mittauksen aikana paljon epäedustavaa dataa keruun muodostamasta pölypilvestä. Mittausdatasta ei myöskään pystytty jälkikäteen leikkaamaan epäedustavia kohtia pois, koska suurin osa mittausvideoista oli kuvattu kamerapuhelimella, eikä niillä otetuista videoista nähty tarkasti mittauslaitteiston paikkaa suhteessa pölypilveen. Datan leikkaus olisi myös ollut työlästä alati muuttuvan tuulen vuoksi. Mittausvideoiden kuvaamiseen kokeiltiin myös Vapo Oy:n dronea. Sillä saatiin kuvattua hyviä videoita, mutta dronen akku ja vara-akku eivät kestäneet montaa mittausta. Lopulta droneen tuli tekninen vika, eikä sitä voitu enää käyttää mittausvideoiden kuvaamisessa. Mahdolliset tulevat turpeen keruun pölyämisen jahtausmittaukset kannattaakin suunnitella paikkoihin ja aikoihin, joissa tuuliolosuhteet ovat melko stabiilit. Myöskin dronea kannattaa tulevaisuudessa käyttää enemmän mittauksen kuvaamisessa, mutta on huolehdittava paremmin sen virran riittävydestä.

Mittauksissa huomattiin, että vesisumutus saattoi loppua kesken mittauksen, vaikka säiliössä oli vettä ja sumutuslaitteisto oli muutenkin kunnossa. Tämä johtui kuljettimen nostosta ja laskusta kesken mittauksen. Kun kuljetinta käytettiin kesken mittauksen, vesisumun säätövipu ponnahti takaisin off-asentoon. Tämän vuoksi kuljettimen käytön yhteydessä oli huomioitava, että vesisumu piti asettaa aina uudelleen käyttöön välittömästi, kun kuljetinta oli käytetty.

Mittauksen aikainen jahtausetäisyys valittiin aluksi vallitsevan tuulennopeuden mukaan niin, että mitä suurempi tuulennopeus oli, sitä suurempi oli jahtausetäisyys. Käytännössä kuitenkin havaittiin, että sopiva jahtausetäisyys mittauksissa oli 7 – 15 metriä. Mikäli jahtausetäisyys oli liian pieni, mitattavan pölypilven massakonsentraatiot olivat hyvin isoja. Tämän vuoksi mittalaitteen sirontavaste saattoi pienentyä huomattavasti, kun mitattava massakonsentraatio oli lähellä mittalaitteen maksimimassakonsentraatiota 200 mg/m^3 . Toisaalta, jos mittaus tehtiin liian kaukaa, pölypilven mittaaminen hankaloitui, koska se dispersoitui ympäröivään ilmaan. Ilmakehän stabiiliusluokka oli Mittauspäivän 22.8.2018 mittauksissa B ja mittauspäivän 21.8.2018 mittauksissa D tai B. Tämän ei kuitenkaan huomattu vaikuttavan merkittävästi mittauksiin tai mittaustuloksiin.

Turvepölypilveä mitattaessa kannattaa käyttää tavallisten halvimpien suojalasien ja hengityssuojainten sijaan maskia, jossa hengityksen ja näön suojaus on yhdistetty ja erillinen moottori kierrättää hengitysilmaa maskissa, koska turvepöly tunkeutuu helposti epälaadukkaiden suojaimien läpi ja vaikeuttaa mittauksen suorittamista. Pölymittauksia tehdessä on Vapo Oy:n ohjesääntöjen mukaisesti noudatettava paloturvallisuutta, koska kuiva turvepöly voi otollisissa olosuhteissa räjähtää. Tämän vuoksi, kun käytetään turvepölyn liikettä rajoittavia elementtejä, esimerkiksi kesän mittauksissa kevytpeitettä, on huolehdittava, että elementeissä ilman paine ei kohoa korkeaksi kuivassa ilmassa. Esimerkiksi vesisumutuksen käyttäminen säännöllisesti ja kevytpeitteen kastelu vähentävät todennäköisesti huomattavasti pölyräjähdysriskiä. Kevytpeite peitti kuljettimen vain osittain, jonka vuoksi siihen ei muutenkaan kerääntynyt merkittävästi painetta opinnäytetyön mittauksissa, vaan ilma pääsi melko vapaasti virtaamaan pois kevytpeitteen alta.

5.2 Mittauslaitteet ja -tekniikat

SICK-hiukkasmittari soveltui hyvin opinnäytetyön aiheen mukaisiin mittauksiin. Se oli toimintavarma, eikä käytössä ilmennyt ongelmia mittausten aikana. Se toimi myöskin erinomaisesti vesisumussa ja tärinässä. Hiukkasmittarin erityispiirre verrattuna muihin harkittuihin vaihtoehtoihin oli, että se mittasi pölyn sirontaa suoraan ulkoilmasta, eikä näytettä imetty laitteen sisälle mitattavaksi, kuten useimmissa vaihtoehtoissa. Tämän vuoksi mittalaitteen mittaus ei aiheuttanut juurikaan häviöitä mitattavaan hiukkaspopulaatioon suhteessa muihin virhelähteisiin ja laite oli muutenkin toimintavarma haastavissa olosuhteissa. Gravitometristen näytteiden mittaaminen SICK-mittauksen lisänä toimi hyvin. Näytteillä pystyttiin myös kalibroimaan hiukkasmittarilla mitattu data riittävän tarkasti mittausten tarkkuusvaatimukset huomioiden. Mittauslaitteiston kokoaminen peräkärryyn onnistui nopeasti ja laitteisto ylipäättään oli toimintavarma eikä käytön kanssa ilmennyt ongelmia. Mittalaitteiden asettelussa huono puoli oli se, ettei mittauskorkeutta pystytty säätämään, jolloin pystyttiin mittaamaan vain 1,5 m korkeudella leijuvia hiukkaspitoisuuksia. Tämä vaikutti mitattuun kokojakaumaan niin, että todennäköisesti suuret hiukkaset olivat yliedustettuja ja pienet hiukkaset aliedustettuja näytteessä.

Vesisumu vaikutti huomattavasti mittaustarkkuuteen. Mittausten jälkeen tai ennen olisi kannattanut tehdä jahtausmittauksia vesisumutukselle ilman turpeen keruuta. Tämän jälkeen olisi luultavasti voitu tarkentaa vesisumun mittalaitteistoa turpeen keruun pölymittausten aikana. Mittausdatasta huomattiin, että mittauspaikan lämpötila laski huomattavasti vesisumun vaikutuksen alaisena. Lämpötilan alenema olisi luultavasti voitu yhdistää SICK:n mittaustuloksiin, mikäli pelkkää vesisumun aiheuttamaa sähkövirtasignaalia olisi mitattu riittävästi. Vesisumun mittalaitteistoa tutkittiin ennen pölyämismittauksia paikallaan olevalle vaunulle lyhyen ajan, mutta tuloksista ei ollut tässä opinnäytetyössä hyötyä.

On-off-mittauksia olisi pitänyt tehdä enemmän pölynsidontatehon tulosten tarkkuuden parantamiseksi. Opinnäytetyön mittauksissa tehtiin vain muutama on-off-mittaus, eikä niissäkään on-off-sykliä toistettu, vaan kokeilut olivat kertaluontoisia. Tämä johtui mittaussuhteiden ja laitteiston toiminnan epävarmuustekijöistä, jolloin haluttiin varmistaa riittävä datan keruu muilla mittaustavoilla. On-off-mittauksissa ei kerätty suodatinnäytettä, koska SICK-hiukkaslaskurin mittausvaste oli erialinen vesisumun ollessa käytössä ja pois käytössä. Mikäli mittauspäiviä paremmissa mittaussuhteissa olisi ollut enemmän, ja sumutuslaitteisto olisi toiminut alusta alkaen ongelmitta, on-off mittauksia olisi voitu tehdä enemmän.

On-off-mittauksilla olisi pystytty vähentämään virhettä, joka aiheutui siitä, että mittauslaitteiston paikka pölypilvessä vaihteli jatkuvasti mittauksen aikana. Välillä mittauslaitteisto ei osunut lähellekään pölypilven konsertoituneinta kohtaa. Näin kävi esimerkiksi mittauspäivän 22.8.2018 mittaussuhteissa, joissa tuulensuunta heitteli arvaamattomasti. Tällaisissa tapauksissa on-off-mittauksetkaan eivät olisi toimineet kovin hyvin. SICK-hiukkaslaskurilla pölypilvestä mitatun sirontasignaalin perusteella olisi voitu määrittää laimentumattoman pölypilven massakonsentraatio, jos olisi lisätty mittauskokonaisuuteen

mittalaitte määrittämään traktorin emittoiman hiilidioksidin konsentraatio ilmassa. Esimerkiksi Hugo Wihersaaren työkoneen päästömittauksia käsittelevässä opinnäytetyössä [74] on käytetty SICK MAIHAK CO_2 -analysaattoria. Koska traktorin laimentamattoman hiilidioksidipäästön konsentraatio voidaan selvittää, olisi pölymittauksien ohessa mitatun hiilidioksidin konsentraation avulla voitu laskea hiilidioksidin laimennussuhde mittauksissa. Hiilidioksidin laimennossuhdedatasta olisi voitu määrittää mitatun turvepölypilven laimennussuhde ja näin tarkentaa huomattavasti mitatusta datasta laskettuja tuloksia.

Jahtausmittaus toimi hyvin tämän opinnäytetyön aiheen mukaisissa mittauksissa, koska sillä saatiin enemmän mittausdataa, kuin pistemittauksilla olisi saatu. Lisäksi voitiin vaikuttaa melko hyvin mittalaitteiston paikkaan suhteessa keruun muodostamaan pölypilveen.

5.3 Parannusehdotukset mekaaniseen kokoojavaunuun ja pölynhallintajärjestelmään

Turpeen keruun aikainen pölynhallinta korkeapainepumpun vesisumutuksella sisälsi haasteita, joihin tässä kappaleessa perehdytään ja ehdotetaan erilaisia parannusehdotuksia. Osa haasteista tiedettiin etukäteen ja osa ilmeni mittauksen aikana. Kokonaisuudessaan ongelmakohdat voidaan jakaa kolmeen osaan: painepumpun tekniset ongelmat kenttäolosuhteissa, painepumpun korkea vedenkulutus sekä keruun aikainen pölyäminen varsinkin vaunun kohdista, johon vesisumulla ei voitu suoraan vaikuttaa.

5.3.1 Pölyämisen hallinta

Opinnäytetyön mittauksissa käytetyn mekaanisen kokoojavaunun pölyämistä turpeen keruun aikana voidaan nykyisestä vähentää sekä vedensumutusjärjestelmää entisestään tehostamalla että siitä riippumattomilla keruuvaunuun tehtävillä muutoksilla.

Mekaanisen kokoojavaunun pölyämistä keruun aikana voidaan vähentää tiivistämällä vaunun tyhjäystä varten rakennetut avausluukut uudestaan. Tämä ei kuitenkaan ole välttämättä kokonaan mahdollista, varsinkin jos vaunu on vaurioitunut esimerkiksi kaatumisen seurauksena ja sen liikkuvat osat eivät ole enää täysin tiivistettävissä. Vaunun etu- ja takaosien yläkohdista pölyä vapautui ilmaan runsaasti. Näiden kohtien tiivistämisellä saataisiin aikaan huomattava pölyämisen väheneminen, koska juuri yläkohdista leviävä pöly kulkeutuu kauimmas ympäristöön. Vaunun takaosan yläpäässä on aukko kuljettimen turpeen keruuta varten, jonka kautta vaunusta myös poistuu turvepölyä ulkoilmaan. Tämän aukon eteen on suunniteltu asennettavaksi kumista läppää, joka estäisi ainakin osittain pölyn pääsemisen ulos keruusäiliöstä, mutta päästäisi ulos virtaavan ilman ohitse. Läpällä voitaisiin myös estää lähes kokonaan poistoilman ulosvirtaus, mutta tällöin säiliön paineen tasoittamiseksi poistoilmalle olisi tehtävä vaihtoehtoinen reitti.

Keruusäiliön poistoilman reitin hallinta voi tulevissa mekaanisten kokoojavaunujen pölyämistä vähentävissä ratkaisuissa olla hyvin tehokas keino hallita keruusäiliöstä tulevaa pölyämistä. Tähän mennessä pöly on purkautunut yllä mainitusti ulkoilmaan säiliön yläkohdista ja epätiiviestä raoista ympäri säiliötä. Tämän sijaan poistoilma ja pöly voitaisiin erillisellä teknisellä ratkaisulla ohjata poistumaan keruuvaunun takaosaan mahdollisimman lähelle maan tasoa. Erillisellä säiliöstä lähtevällä putkella pöly voitaisiin ohjata niin, että maahan laskeutumaton pöly kulkeutuisi kuljettimeen ja vaunun takaseinään asennetun vesisumutuksen kautta.

Vedensumutuslaitteiston aiheuttaman pölynsidonnan havaittiin olevan heikkoa ilman kevytpeitettä. Tämän vuoksi kuljettimen päällä olevaa peitettä tulisi laajentaa niin paljon kuin mahdollista ja sen materiaalin tulisi olla kestävämpää. Tämän suhteen käytännön ratkaisuista keskusteltiin Vapo Oy:n toimihenkilöiden kanssa 7.2.2019 pidetyssä diplomityön esittelytilaisuudessa ja joitakin ratkaisuja on koottu esittelytilaisuuden kalvoihin.

5.3.2 Painepumppun vesisumutuksen optimointi

Sumutussuuttimien sumutuskulmaa ja etäisyyttä toisistaan tulisi harkita uudelleen. Kuten kuvasta 5.1 nähdään, elementeistä sumutettu vesisumu risteää jo melko aikaisessa vaiheessa, noin puolen metrin etäisyydellä elementistä, kun pisaroiden tehollinen pölynsitomismatka on karkeasti arvioituna noin kaksi metriä. Aikainen risteäminen todennäköisesti aiheuttaa pisaroiden ylimääräistä törmäilyä, jolloin niiden nopeus pienenee ja pisarakoko kasvaa tarpeettoman suureksi ja lukumääräkonsentraatio pienenee. Myöskin sumutettava alue pienenee, kun suuttimet ovat lähellä toisiaan. Mikäli suuttimet asennettaisiin kauemmas toisistaan ja suuttimien sumutuskulmaa pienennettäisiin sumutuksen pölynsidontatehokkuus todennäköisesti kasvaisi.

Kuten opinnäytetyön mittauksissa havaittiin, pölynhallintajärjestelmä sitoo ilmasta pölyä tehokkaasti nykyisellä vedenkulutuksella. Voidaan olettaa, että lisäämällä nykyisessä systeemissä vedenkulutusta ei pölynsidontateho enää merkittävästi nouse. Tähän viittasivat myös kesän mittaukset. Mittauspäivänä 21.8.2018 veden käyttöpaine oli huomattavasti alhaisempi kuin tietyt mittaukset mittauspäivänä 22.8.2018, jolloin vedenkulutus oli korkeampi. Tästä huolimatta laskettu keskimääräinen pölynsidontateho oli hieman heikompi, eli voidaan sanoa, että todennäköisesti veden käytön lisääminen ei tehosta merkittävästi systeemin toimintaa.

Tätä vastoin, mikäli vaunun pölynhallintajärjestelmään tehdään alikappaleen 5.3.1 mukaiset muutokset, on perusteltua olettaa, että pölyäminen vähenee merkittävästi ja hyvä pölynsidontateho saavutetaan pienemmällä vedenkulutuksella. Vedenkulutuksen vähentäminen tehokas pölynsidontateho säilyttäen voidaan toteuttaa vähentämällä käytettävien sumutussuuttimien määrää, suuntaamalla ja asettelemalla suuttimet uudelleen ja vaihtamalla niitä vähemmän vettä kuluttaviin malleihin. Myös pumpun kättöpainetta voidaan pienentää. Yksityiskohtaisempia ehdotuksia ja laskelmia vedenkulutuksen vähentämisestä



Kuva 5.1. Suutinelementin vedensumutus ympäröivään ilmaan. Elementistä lähtevät yksittäiset vesisumut risteävät muutaman metrin päässä sumutussuuttimista ja muodostavat yhtenäisen vesisumupilven

löytyy Vapo Oy:n toimihenkilöiden kanssa 7.2.2019 pidetyssä diplomityön esittelytilaisuudessa esitellyistä kalvoista. Myös alikappaleesta 3.4.4 löytyy laskelmia vedenkulutuksen alenamiseksi.

Vedenkulutuksen alentamisen vaikutusta tulisi testata erikseen, mutta voidaan olettaa tässä alikappaleessa edellä mainitun perusteella ja esimerkiksi alikappaleissa 3.1.1 ja 3.1.3 kerrottujen vesisumutuksen ominaisuuksien perusteella, että 25 %:n vedenkäytön vähennys sopivin muutoksin systeemiin pitäisi laitteiston pölynhallinnan tehokkaana. Mikäli vesisumutuksen halutaan kestävän lähes koko työpäivän yhdellä tankin välitäytöllä, tulisi vedenkulutusta vähentää noin 50 %:a. Tämä ei kuitenkaan ole tarpeellista, mikäli turpeenkeruuta ennen suunnitellaan keruureitti, niin että vesisumua ei tarvitse kaikilla keräysalueilla käyttää.

Suuremmilla teknisillä muutoksilla vedensumutusjärjestelmästä voidaan tehdä myös kauko-ohjattava. Tällöin painepumpun voisi laittaa halutessaan päälle ja pois päältä erillisellä ohjaimella. Ohjaimessa voisi olla myös painepumpun käyttöpaineen säätö, jolla voidaan ajon aikana säätää käyttöpainetta, sumuttavia suuttimia ja muita parametreja reaaliaikaisen pölyämisen mukaan ja optimoida näin vesisumun käyttöä keruun aikaiselle pölyämiselle sopivaksi.

5.3.3 Veden sumutuksen tekniset haasteet

Veden sumutuksen tekniset ongelmat liittyivät hydraulikkaan ja veden kulkuun putkia pitkin vesisäiliöstä sumutussuuttimille. Vaikka mittauksissa käytettiin vesijohtovettä, sumutusjärjestelmän suodatin tukkeutui yleensä muutaman mittauksen välein. Tämä tarkoitti noin 15-20 minuuttia tehokasta keruu-aikaa. Suodatin oli käyttöön nähden liian pieni, joten sen tilalle pitäisi vaihtaa huomattavasti suurempi suodatin. Vesisäiliöstä sumutussuuttimille kulkevassa vedessä oli suodatuksesta huolimatta epäpuhtauksia, jotka aiheuttivat tukoksia kaikista ahtaimmissa putkiston kohdissa, kuten liitoskohdissa. Tämä ongelma ratkaistiin mittausten aikana poraamalla liian pienet liitosten väliset aukot suuremmiksi, jonka jälkeen tukkeumia ei ilmennyt. Myöskin vesisäiliön ja suodattimen välinen letku tukkeutui kerran kolmipäiväisten mittausten aikana. Tämän letkun voisi suurempien liitosten avulla vaihtaa poikkipinta-alaltaan leveämpään vastaavaan.

Suuttimia puhdistaessa havaittiin myös suuttimiin kerääntyneen ruostetta. Koska ruoste todennäköisesti oli kerääntynyt suuttimiin putkiston metalliosista tai metallisista suutinelementeistä, tulevaisuudessa alati ruostuvat metalliosat voivat aiheuttaa lisää ongelmia vesisumutuslaitteistossa. Tämän vuoksi laitteiston ruostuvien osien tilalle olisi hyvä pitkäaikaista käyttöä varten suunnitella korvaavia ruostumattomia materiaaleja. Ennen metallisia suutinelementtejä elementtien materiaalina oli käytetty muovia. Elementteihin liitetyt letkut kuitenkin irtosivat korkeilla käyttöpaineilla elementtien kierteistä, jonka vuoksi muovielementit korvattiin metallisilla.

Tällä hetkellä pölynsidontalaitteiston korkeapainepumppu saa käyttövoimansa traktorin hydraulikasta. Traktorin hydraulikan pumpulle antamaa käyttövoimaa voidaan säädellä, mutta tästä huolimatta sen käyttö aiheuttaa traktorin hydraulikkaöljyssä ylimääräistä kuumenemista, mikä voi osaltaan aiheuttaa ongelmia traktorin toimintaan pitkäaikaisessa käytössä. Valkianevan imuvaunun korkeapainepumppu saa käyttövoimansa keruuvaunun hydraulikasta. Myös opinnäytetyön mittauksissa käytetylle mekaaniselle kokoojavaunulle on ehdotettu tehtävän teknisiä muutoksia niin, että korkeapainepumppu saisi käyttövoimansa traktorin hydraulikan sijaan mekaanisesta kokoojavaunusta.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihe jakautui kahteen osaan, joista ensimmäinen oli kirjallisuusselvitys suomalaisilla turvetuotantoalueilla tapahtuvasta pölyämisestä ja sen mittaamisesta sekä pölynhallinnassa käytettävän vesisumutuksen ominaisuuksista ja sen tehokkaaseen käyttöön liittyvistä tekijöistä. Toinen osa oli käytännön mittausten suunnittelu, toteutus sekä mittauksista ja parannusehdotuksista raportointi. Mittauksissa selvitettiin Vapo Oy:n mekaaniseen kokoojavaunuun kehittämän korkeapainevesisumutukseen perustuvan pölynhallintajärjestelmän toimivuutta turpeenkeruun aikana. Mittauksilla haluttiin selvittää järjestelmän ominaisuuksia pölynhallinnassa sekä optimoida sen vedenkulutusta, niin että pölynhallinta tapahtuu tehokkaasti sekä ilmassa leijuvan pölyn sitoutumisen että vedenkulutuksen osalta. Lisäksi haluttiin saada tietoa järjestelmän toimivuudesta kenttäolosuhteissa sekä kerätä mittauksissa havaintoja, joilla mekaanisen kokoojavaunun pölyämistä pystyttäisiin vähentämään.

Kirjallisuusosuudessa havaittiin, että tähän mennessä suomalaisessa turvepölytutkimuksessa pölymittaukset on tehty kiinteäpaikkaisina pistemittauksina tai jälkikäteen erillisistä turvenäytteistä tehtyinä laboratorioanalyysinä. Turvepölyn hiukkaskokojakauma ja massakonsentraatio riippuvat vahvasti työskentelymenetelmästä, keruun vaiheesta, turpeen laadusta ja ympäristöstä. Ympäristön vaikutusta reaaliaikaisiin läheltä pölyn lähdeä tehtäviin mittauksiin pidettiin kuitenkin pienenä virhetekijänä verrattuna muihin tekijöihin [72]. Keskimääräinen turpeen keruusta emittoituva hiukkaskoko on lukuun ottamatta uuden aikaisen pölynerotusmenetelmän omaavia imuvaunuja suuri, useita kymmeniä mikrometrejä. Lisäksi keruun aikaiset ilmaan emittoituneet pölyn massakonsentraatiot ovat aikaisemmassa suomalaisessa turvepölytutkimuksessa ajoittain korkeita, keskimäärin jopa satoja milligrammoja kuutiometriä kohden [27, 79]. Tässä opinnäytetyössä mitatut konsentraatiot olivat pienempiä, yleensä kymmeniä milligrammoja kuutiometriä kohden.

Käytännön sovelluksissa vesisumutus pölynhallinnassa ei ole yleensä tehokasta, mikäli se perustuu pelkästään ilmassa leijuvien pölyhiukkasten laskeuttamiseen sumulla. Sumutussuuttimen malli vaikuttaa vahvasti pölynsidontatehokkuuteen. Mitä enemmän sumutussuutin indusoi sumutuksellaan ilmavirtoja sitä tehokkaampaa on pölyn dispersoituminen ilmassa, jolloin vesisumutuksen pölynsidontateho ilmassa pienenee. Tämän vuoksi vesisumutukseen kannattaa ottaa mukaan fyysisiä elementtejä, joilla ohjataan sumutussuuttimien ilmavirtoja sekä lisätään systeemissä tapahtuvia pölyhiukkasten törmäyksiä. Näin sitoutetaan enemmän ilmassa leijuvia pölyhiukkasia sekä rajoitetaan niiden kulkemista ulkoilmaan. Vesisumutuksella tapahtuva pölynhallinta on yleistäen teoriassa

tehokkaimmillaan, kun suutinvalinta on pölynhallintatilanteeseen oikea, käyttöpaine ja vedenkulutus ovat korkeita, sumutussuuttimet on suunnattu suoraan pölyä muodostavaan lähteeseen ja asetettu sen lähietäisyydelle ja vesisumun vesipisaran koko enintään on noin 100-kertaa suurempi kuin sidottavien hiukkasten koko [7, 29]. Sumutettavan veden pölynkeräysteho kasvaa pienille noin kahden mikrometrin kokoisille ja pienemmille hiukkasille, jos veteen lisätään pölyävän materiaalin ominaisuuksista riippuvaa tensidiä eli vedenpehmenintä [57].

Opinnäytetyön pölynhallintajärjestelmän toiminnan testaamiseen ja turpeen keruun pölyämiseen liittyvät mittalaitemittaukset tehtiin neljän päivän aikana. Yhden päivän aikana testattiin korkeapainepumppu Dynaset HPW 200:n vedenkulutusta eri käyttöpaineilla ja myös kolmen pölymittauspäivän aikana seurattiin vedenkulutusta satunnaisesti. Pölymittaukset ja pölynhallintajärjestelmän testaaminen tehtiin kolmena perättäisenä mittauspäivänä Vapo Oy:n Sompanevan turvetuotantoalueen Hanhinevalla yhteistyössä Rambollin kanssa. Pölyn mittaukseen käytettiin SICK FW101 optista hiukkasmittaria ja Zambellin Easy PLUS suodatinkeräystä. Mittauksissa suodatinnäytteitä kerättiin samanaikaisesti, koska SICK ilmoitti mittaamansa sirontavasteen sähkösignaalidatana (mA), mutta mittauksista haluttiin arvio pölypäästöjen massakonsentraatioista. SICK:illä mitattua dataa verrattiin samanaikaisesti mitattuihin suodatinnäytteistä laskettuihin pölypäästöjen massakonsentraatioihin ja saatiin näin arvio SICK:in sähkösignaalidatan ja pölypäästöjen massakonsentraatioiden välille. Ympäristön säädataa mitattiin Davis:in Vantage Pro2 langattomalla sääasemalla. Mittauksissa mitattiin mekaanisen kokoojavaunun JMK-55V turpeen keruun aikaisia pölypäästöjä siihen asennetun pölynhallintajärjestelmän vesisumutuksen ollessa joko pois käytössä tai käytössä. Mittaukset tehtiin jahtausmittauksina seuraten turpeenkeruuta mönkijällä tietyltä etäisyydeltä. Mönkijän peräkärriyn oli asennettu keruun aikaista pölyämistä mittaavat mittalaitteet. Mittauksia tehtiin sekä ajamalla pitkiä jaksoja keruu vaunun perässä samoin vesisumutuksen asetuksin että on-off mittauksina, joissa vesisumu asetettiin joko kesken keruun käyttöön tai pois käytöstä.

Kerätyn ja käsitellyn datan pohjalta pölynhallintajärjestelmän mittauspäivien keskimääräisen pölynsidontatehon laskettiin olleen noin $73 \pm 10\%$. Parhaiten laskennallinen pölynsidontateho saatiin alhaisilla täyttöasteilla 0 – 40% ja täyttöasteella 80 – 100%. Pölynsidontateho oli heikointa, kun keruuvaunun säiliön täyttöaste oli 40 – 80%. Vesisumutuksella ei pystytty todennäköisesti merkittävästi vaikuttamaan säiliöstä tapahtuvan pölyämisen hallintaan, koska sumutus suuntautui vaunun takapäähän keruuhihnan läheisyyteen kauas säiliöstä.

Johtuen korkeasta käyttöpaineesta ja suutinvalinnoista korkeapainepumpun vedenkulutus pölymittausten aikana oli liian korkea käytännön turpeen keruuta ajatellen, koska vesisäiliö tyhjeni mittausten aikana useasti. Paineumpun vedenkulutusta pystytään kuitenkin todennäköisesti optimoimaan, niin että vedenkulutus saadaan tyydyttävälle tasolle. Samalla pölynhallintajärjestelmän pölynsidontaominaisuudet pystyttäisiin pitämään tehokkaana, jos järjestelmään tehdään teknisiä muutoksia luvun 5 mukaisesti. Pölymittausten aikana pölynhallintajärjestelmän käytössä ilmeni teknisiä ongelmia, jotka liittyivät enim-

mäkseen letkujen sekä niiden liitoskohtien, suuttimien ja suodattimen tukkeutumiseen. Teknisten ongelmien ratkaisu on tällä hetkellä suurin haaste pölynhallintajärjestelmän tehokkaan toiminnan ja tulevan käytön kannalta.

LÄHDELUETTELO

- [1] A. H. Abdelmajid. Accurate measurement of On/Off time for 802.11 b/g WLAN/Wi-MAX LNAs. *High Frequency Electronics* (2009), 18–25.
- [2] K. Ardon-Dryer, Y.-W. Huang ja D. J. Cziczo. Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15.16 (2015), 9159–9171.
- [3] J. Bij de Vaate, G. Kant, W. van Cappellen ja S. van der Tol. First Celestial Measurement Results of the Thousand Element Array. *URSI GA, Maastricht* (2002).
- [4] A. B. Cecala, A. D. O'Brien, J. Schall, J. F. Colinet, W. R. Fox, R. J. Franta, J. Joy, R. Reed, P. W. Reeser, J. R. Rounds ja M. J. Schultz. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing (RI 9689) (2012), 1–248. URL: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2012-112.pdf>.
- [5] A. B. Cecla, J. C. Volkwein ja E. D. Thimons. *Adding Steam To Control Dust in Mineral Processing*. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1985.
- [6] G. J. Chekan, J. F. Colinet, F. N. Kissell, J. P. Rider, R. P. Vinson ja J. C. Volkwein. Performance of a light-scattering dust monitor in underground mines (2007).
- [7] L. Cheng. Collection of Airborne Dust by Water Sprays. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 12.3 (1973), 221–225. ISSN: 01964305. DOI: 10.1021/i260047a002.
- [8] H. Clausnitzer ja M. Singer. Environmental influences on respirable dust production from agricultural operations in California. *Atmospheric Environment* 34.11 (2000), 1739–1745.
- [9] S. S. Co. *Flat Spray Nozzles*. [Online; haettu 14-Heinäkuu-2018]. 2011. URL: <http://www.ispray.com/ecatalog/flat-spray-standard/en>.
- [10] J. Colinet, J. Listak, J. Organiscak, J. Rider ja A. Wolfe. Best practices for dust control in coal mining (2010). URL: <http://stacks.cdc.gov/view/cdc/5482>.
- [11] A. Costa ja M. Guarino. Particulate matter concentration and emission factor in three different laying hen housing systems. *Journal of Agricultural Engineering* 40.3 (2009), 15–24.
- [12] M. E. Deary, S. J. Bainbridge, A. Kerr, A. McAllister ja T. Shrimpton. Practicalities of mapping PM10 and PM2.5 concentrations on city-wide scales using a portable particulate monitor. *Air Quality, Atmosphere and Health* 9.8 (2016), 923–930. ISSN: 18739326. DOI: 10.1007/s11869-016-0394-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-016-0394-3>.
- [13] S. Enbom, K. Heinonen ja M. Lehtimäki. *Vesisumun käyttö pölynhallinnassa*. INVE-NET-Teknologiaohjelma Raportti 62. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto, 1996.
- [14] P. Fabian, R. Cusack, P. Hennessey ja M. Neuman. Demystifying the selection of mist eliminators. *Chemical Engineering* 100.11 (1993), 148.

- [15] T. Gemci, N. Chigier ja J. Organiscak. Spray characterization for coal mine dust removal. Teoksessa: *9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS 2003)*, July. 2003, 13–17.
- [16] M. Happonen ja E. Järvinen. *Turvetuotannon ja mekaanisen kokoojavaunun pölypäästöselvitys 2016-2018*. Tekninen raportti. Kuopio: Bioenergiayhdistys RY, 2017, 29.
- [17] W. C. Hinds. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons, 2012.
- [18] B. Holmén, D. Miller, A. Hiscox, W. Yang, J. Wang, T. Sammis ja R. Bottoms. Near-source particulate emissions and plume dynamics from agricultural field operations. *Journal of Atmospheric Chemistry* 59.2 (2007), 117–134. DOI: 10.1007/s10874-007-9086-6.
- [19] B. A. Holmn, T. A. James, L. L. Ashbaugh ja R. G. Flocchini. Lidar-assisted measurement of PM10 emissions from agricultural tilling in California's San Joaquin Valley - Part I: Lidar. *Atmospheric Environment* 35.19 (2001), 3251–3264. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00518-5.
- [20] Hyperphysics. *Relative Humidity*. [Online; haettu 21-Tammikuu-2019]. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html>.
- [21] S. Iivonen. Ympäristöturpeet ja niiden käyttö. *Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti, Raportteja* 32 (2008), 60.
- [22] *Industrial hydraulic spray products*. Wheaton, USA: Spraying Systems Co., 2015. URL: https://www.spray.com/literature/literature_cat75.aspx.
- [23] Insinööritoimisto Paavo Ristola. Kivihiilen pölyäminen kuljetuksen yhteydessä ja varastoinnin aikana Loviisan satamassa (1991).
- [24] A. Ikonen. *Pöly turvetuotannossa*. Helsinki: Työterveyslaitos, 1978. ISBN: 951-801-115-X.
- [25] N. I. Jayaraman ja R. A. Jankowski. Atomization of water sprays for quartz dust control. *Applied Industrial Hygiene* 3.12 (1988), 327–331.
- [26] M. Kallio, K. Nylander ja T. Järvinen. *Imukokoojavaunun turpeentuotantoteho ja pölyäästöt*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1984.
- [27] R. Kartasempää, R. Varjoranta, E. Rantakrans, H. Saari, J. Marja-aho, P. Selin ja H. S. *Turvetuotannon pölypäästöt ja ympäristö : pölypäästöt ja niiden leviäminen imukokoojavaunutuotannossa*. Tutkimus on osa TEKESin rahoittamaa SIHTI-ohjelmaa. Helsinki: Ilmatieteen laitos, 1998, 77 sivua + 32 liitelehteä.
- [28] Kekkila. *Imeytysturve Kekkila (50 L)*. [Online; haettu 17-Tammikuu-2019]. URL: [http://www.ikaros.fi/fi/Tuotteet/Imeytystarvikkeet/Suosittu_imeytysaineet/Imeytysturve_Kekkila_\(50_L\)?id=605](http://www.ikaros.fi/fi/Tuotteet/Imeytystarvikkeet/Suosittu_imeytysaineet/Imeytysturve_Kekkila_(50_L)?id=605).
- [29] F. N. Kissell. Information Circular 9465 Handbook for Dust Control in Mining (2003), 1–131.
- [30] B. Komppula, J. Waldén, K. Lusa, K. Kyllönen, H. Saari, M. Vestenius, J. Salmi ja J. Latikka. Ilmanlaadun mittausohje 2017 (2017).

- [31] J. Laaksonen ja M. Hirsimäki. *Fysiikan oppilaslaboratorio - Virheiden ja tulosten analysoiminen*. [Online; haettu 17-Tammikuu-2019]. URL: <https://moodle2.tut.fi/course/view.php?id=6867>.
- [32] L. S. Lebel, M. H. Piro, R. MacCoy, A. Clouthier ja Y.-S. Chin. Concept for a cyclonic spray scrubber as a fission product removal system for filtered containment venting. *Nuclear Engineering and Design* 297 (2016), 60–71.
- [33] A. Leinonen. *Turpeen tuotanto ja käyttö Yhteenvedo selvityksistä*. Tekninen raportti. Helsinki: VTT, 2010. URL: [url:%20http://www.vtt.fi/publications/index.jsp](http://www.vtt.fi/publications/index.jsp).
- [34] M. Marjamäki ja J. Kerkinen. *Technologies for Measuring Particulates - Views and conclusions from the FINE particles - Technology, Environment and Health Technology Program*. 2006, 1–30. ISBN: 9524572486.
- [35] E. Meets ja A. Neethling. Some experiences in the use of wetting agents to suppress dust at Sigma Colliery. *J. Mine Vent. Soc. S. Africa* 40 (1987), 126–133.
- [36] A. Mellais. *Sarasuo-rahkasuovaihtuman kasvillisuushistoria neljällä boreaalisella rahkasuolla – ajallinen ja alueellinen näkökulma*. Tutkielma. Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteiden laitos, Maantieteen osasto, 2013.
- [37] D. C. Mussatti, R. Srivastava, P. M. Hemmer ja R. Strait. EPA air pollution control cost manual. *Air Quality Strategies and Standards Division of the Office of Air Quality Planning and Standards, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711* (2002).
- [38] Natura. *Turve, politiikan pehmeä käsite*. [Online; haettu 18-lokakuu-2017]. 2016. URL: <http://www.naturalehti.fi/2016/03/09/turve-politiikan-pehmea-kasite/>.
- [39] J. Nuutinen. *Turvetuotannon pöly- ja melupäästöt sekä vaikutukset lähialueen ilmanlaatuun*. Kuopio: Symo Oy, 2007.
- [40] J. Nuutinen, J. Kärtevä ja T. Lylyjärvi. *Turvetuotantokoneiden liikkumisen ja pölypitoisuuksien seuranta Isonavalla*. Kuopio: Symo Oy, 2007, 42.
- [41] N. Oceanic ja A. Administration. *LIDAR—Light Detection and Ranging—is a remote sensing method used to examine the surface of the Earth*. [Online; haettu 14-Joulukuu-2017]. 2013. URL: <https://www.webcitation.org/6H82i1Gfx?url=http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>.
- [42] Y. S. Oy. *Siilinjärven kaivoksen sivukivialueiden laajennus: Ympäristövaikutusten arviointiohjelma*. [Online; haettu 21-marraskuu-2017]. 2013. URL: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Ymparistovaikutusten_arviointi/YVAhank%5C-keet/Yara_Suomi_Oyn_Siilin%5C-jarven_kaivoksen_sivukivialueiden_laa%5C-jen%5Cnus_Siilinjärvi.
- [43] S. J. Page ja R. A. Jankowski. Correlations Between Measurements with RAM-land Gravimetric Samplers on Longwall Shearer Faces. *American Industrial Hygiene Association Journal* 45.9 (1984), 610–616.
- [44] J. Pakarinen. *Siirrettävän murskauslaitoksen pölynsidonta*. Diplomityö: TTKK, Konetekniikan osasto, Tuotantotekniikka. 1992.

- [45] S. Pärnänen. *Korkeimman hallinto-oikeuden päätös*. Tekninen raportti. Diaarinumero 759/1/07. Maaliskuu 2008.
- [46] M. Polat, H. Polat, S. Chander ja R. Hogg. Characterization of airborne particles and droplets: Relation to amount of airborne dust and dust collection efficiency. *Particle and Particle Systems Characterization* 19.1 (2002), 38–46. ISSN: 09340866. DOI: 10.1002/1521-4117(200204)19:1<38::AID-PPSC38>3.0.CO;2-S.
- [47] D. Pollock ja J. Organiscak. Airborne dust capture and induced airflow of various spray nozzle designs. *Aerosol Science and Technology* 41.7 (2007), 711–720. ISSN: 02786826. DOI: 10.1080/02786820701408517.
- [48] Queensland Government. *Tapered element oscillating microbalance*. [Online; haettu 10-Tammikuukuu-2018]. 2017. URL: <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air-pollution/oscillating-microbalance>.
- [49] S. Roy, R. Desikan ja S. P. Duttagupta. A Novel, Compact Optical Device for Estimating the Methane Emissions in Geological Environment. *arXiv preprint arXiv:1611.08797* (2016).
- [50] M. Rumney et al. *LTE and the evolution to 4G wireless: Design and measurement challenges*. John Wiley & Sons, 2013.
- [51] L. Saarinen. *Turvetuotantoalueen ympäristötarkastus*. [Online; haettu 21-Huhtikuukuu-2019]. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54711/Saarinen_Lauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [52] SICK sensor intelligence. *SICK, Operating Instructions FW100*. [Online; haettu 18-Joulukuukuu-2018]. 2012. URL: https://www.sick.com/media/dox/1/11/611/Operating_instructions_FW100_Dust_Concentration_Monitor_en_IM0049611.PDF.
- [53] J. P. Smith, P. A. Baron ja D. J. Murdock. Response Characteristics of Scattered Light Aerosol Sensors Used for Control Monitoring. *American Industrial Hygiene Association Journal* 48.3 (1987). PMID: 3578033, 219–229. DOI: 10.1080/15298668791384661. eprint: <https://doi.org/10.1080/15298668791384661>. URL: <https://doi.org/10.1080/15298668791384661>.
- [54] {Spraying Systems Co.}. *A Guide to Spray Technology for Dust Control*. Wheaton: Spraying Systems Co., 2008. URL: https://www.spray.com/literature_pdfs/German/B652-EN-D_Dust_Control.pdf.
- [55] V. Tasić, M. Jovašević-Stojanović, S. Vardoulakis, N. Milošević, R. Kovačević ja J. Petrović. Comparative assessment of a real-time particle monitor against the reference gravimetric method for PM 10 and PM 2.5 in indoor air. *Atmospheric Environment* 54.2012 (2012), 358–364. ISSN: 13522310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.02.030.
- [56] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. *Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi*. [Online; haettu 21-marraskuu-2017]. 2004. URL: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/index.htm>.
- [57] M. W. Tessum ja P. C. Raynor. Effects of Spray Surfactant and Particle Charge on Respirable Coal Dust Capture. *Safety and Health at Work* 8.3 (2017), 296–305.

- ISSN: 20937911. DOI: 10.1016/j.shaw.2016.12.006. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2093791117300604>.
- [58] M. W. Tessum, P. C. Raynor ja L. Keating-Klika. Factors influencing the airborne capture of respirable charged particles by surfactants in water sprays. *Journal of occupational and environmental hygiene* 11.9 (2014), 571–582.
 - [59] M. W. Tessum. Effects of Spray Surfactant and Particle Charge on Respirable Dust Control. Tohtorinväitöskirja. The university of Minnesota, 2015.
 - [60] J. M. Tissari, T. Yli-Tuomi, T. M. Raunemaa, P. T. Tiitta, J. P. Nuutinen, P. K. Willman, K. E. Lehtinen ja J. K. Jokiniemi. Fine particle emissions from milled peat production. *Boreal Environment Research* 11.4 (2006), 283–293. ISSN: 12396095.
 - [61] C.-J. Tsai, T.-S. Shih ja J.-D. Lin. Laboratory Testing of Three Direct Reading Dust Monitors. *American Industrial Hygiene Association Journal* 57.6 (1996), 557–563. DOI: 10.1080/15428119691014774. URL: <https://doi.org/10.1080/15428119691%5C-014774>.
 - [62] Vaisala Oyj. *Humidity conversion formulas-Calculation formulas for humidity*. Helsinki, 2010. URL: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf.
 - [63] S. Valtioneuvosto. *Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta*. [Online; haettu 4-Tammikuu-2018]. 2017. URL: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2017/20170079>.
 - [64] M. Vanninen. Tyypillisten biomassamateriaalien kemiallinen koostumus. Tutkielma. Jyväskylän yliopisto, 2009, 47. URL: https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/21265/URN_NBN_fi_jyu-200906261753.pdf?sequen.
 - [65] M. Vartiainen, M. Jantunen, P. Willman, T. Yli-Tuomi, T. Rauenmaa, M.-A. Jari ja S. Pirkko. *Turvetuotannon pölypäästöjen ympäristöterveysriski: Loppuraportti*. Tekninen raportti MSU-CSE-06-2. Kansanterveyslaitos, 1998, 35.
 - [66] R. Vesterinen. *Pölylaskeumat turpeen tuotannossa ja käytössä*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1989.
 - [67] K. Virtanen. Turvevarat, turvemaiden käyttö ja turpeen energiakäyttö Suomessa (energianäkökulma). *Esitelmä Suomen Geologisessa Seurassa* 10 (2011), 2011.
 - [68] K. Virtanen, P. Hänninen, R.-I. Kallinen, S. Vartiainen, T. Herranen ja R. Jokisaari. *Suomen Turvevarat 2000 - The peat reserves of Finland in 2000*. Vol. 156. 2003. ISBN: 9516908446.
 - [69] L. Vulliet, B. Schrefler ja L. Laloui. *Environmental geomechanics*. EPFL Press, 2002.
 - [70] J. Walden, R. Hillamo, M. Aurela, T. Makela ja S. Laurila. *Demonstration of the equivalence of PM2.5 and PM10 measurement methods in Helsinki 2007-2008*. 2010, 108. ISBN: 9789516977259. DOI: ISBN978-951-697-726-6. URL: <http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/julkaisu/pdf/vertailulab/PM-equivalence%20report-FMI.pdf>.
 - [71] J. M. Wallace ja P. V. Hobbs. *Atmospheric science: an introductory survey*. Vol. 92. Elsevier, 2006.

- [72] J. Wang, A. L. Hiscox, D. R. Miller, T. W. Sammis ja W. Yang. A Note on the Measurement of Dust Emissions from Moving Sources in Agricultural Field Operations (2009), 1–8.
- [73] F. White. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Prevention through Design (PtD) Workshop Closing Remarks. *Journal of safety research* 39.2 (2008), 203–204.
- [74] H. Wihersaari. Työkoneiden pakokaasupäästöjen mittaaminen todellisessa ympäristössä. Tutkielma. Tampereen teknillinen yliopisto, 2015. URL: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/23509>.
- [75] W. E. Wilson ja H. H. Suh. Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47.12 (1997), 1238–1249. ISSN: 21622906. DOI: 10.1080/10473289.1997.10464074.
- [76] X. Xie, Y. Li, A. T. Chwang, P. L. Ho ja W. H. Seto. How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air* 17.3 (2007), 211–225. ISSN: 09056947. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.
- [77] P. Yle, M. Asiello ja C. Lark. Density changes of black carbon particles and effects on particle movement and storage. Teoksessa: vol. 2553. 2016.
- [78] T. Yli-Tuomi ja T. Raunemaa. *Turvetuotannon PM2.5-päästöt: Pölypäästölähteiden osuudet : mittaukset kesällä 1998 Vieremän kortesuolla*. Kuopio: Kuopion yliopisto, 1999, 36, sivua.
- [79] T. Yli-Tuomi, P. Tiitta, P. Willman, J. Nuutinen ja T. Raunemaa. *Pienhiukkasten aiheuttama pölyhaitta jysinturvetuotannossa : imukokoojavaunujen PM2.5- ja kokonaispölypäästöt sekä imukokoojavaunumenetelmän työvaiheiden PM2.5-hajapäästöt*. Kuopio: Kuopion yliopisto, 1999, 54, [5] sivua.

A PÖLYMITTAUSTEN MITTAUSKOHTAINEN DATA

Tähän liitteeseen on lisätty kaikki oleellinen data, jotta voidaan hahmottaa pölymittausten yksityiskohtainen suorittaminen sekä kerätyn datan arvot mittauspäivinä 20–22.8.2018.

A.1 Mittauskohtaiset parametrit

Taulukoihin A.1, A.2, A.3 ja A.4 on kerätty kaikki päivien 20-22.8.2018 pölymittauksiin liittyvät oleelliset parametrit keskiarvoistettuna. Toisen mittauspäivän data on jaettu kahteen taulukkoon.

Taulukko A.1. Päivän 20.8.2018 mittausten keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0°. Jähtäusetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa.

Mittausnumero	1.	2.	3.
Vesisumu käytössä	Epäkunnossa	Epäkunnossa	Ei
Käyttöpaine (bar)	Ei tiedossa	Ei tiedossa	-
Jahtausetäisyys (m)	5	5	5
Mitattu virtasignaali (mA)	5,6	6,0	5,2
Mitattu massakonsentraatio (mg/m ³)	Ei mittausta	84,2	170,8
Tuulennopeus (m/s)	3,7	2,0	3,2
Tuulen suunta suhteessa keruuvaunun suuntaan (°)	15	56	13
Lämpötila (°C)	19,5	19,0	18,0
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	23	24	28
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	Ei mittausta	Ei mittausta	Ei mittausta
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	0	47	0
Ilmakehän stabiilius	B	B	B

Taulukko A.2. Päivän 21.8.2018 mittausten 4–6 keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa.

Mittausnumero	4.	5.	6.
Vesisumu käytössä	Ei	Pois käytöstä kesken mittauksen	Epäkunnossa
Käyttöpaine (bar)	-	37	Ei tiedossa
Jahtausetäisyys (m)	7	7	9
Mitattu virtasignaali (mA)	6,1	5,1	5,3
Mitattu massakonsentraatio (mg/m ³)	67,4	29,5	78,1
Tuulennopeus (m/s)	3,6	5,3	Ei mittausta
Tuulen suunta suhteessa keruuvaunun suuntaan (°)	38	54	Ei mittausta
Lämpötila (°C)	11,8	12,2	13,5
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	25	23	20
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	Ei mittausta	Ei mittausta	1,3
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	0	0	0
Ilmakehän stabiilius	B	B	B

Taulukko A.3. Päivän 21.8.2018 mittausten 7–12 keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruuvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaoisan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruuvaunun etenemissuuntaan on 0°. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruuvau-nusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa.

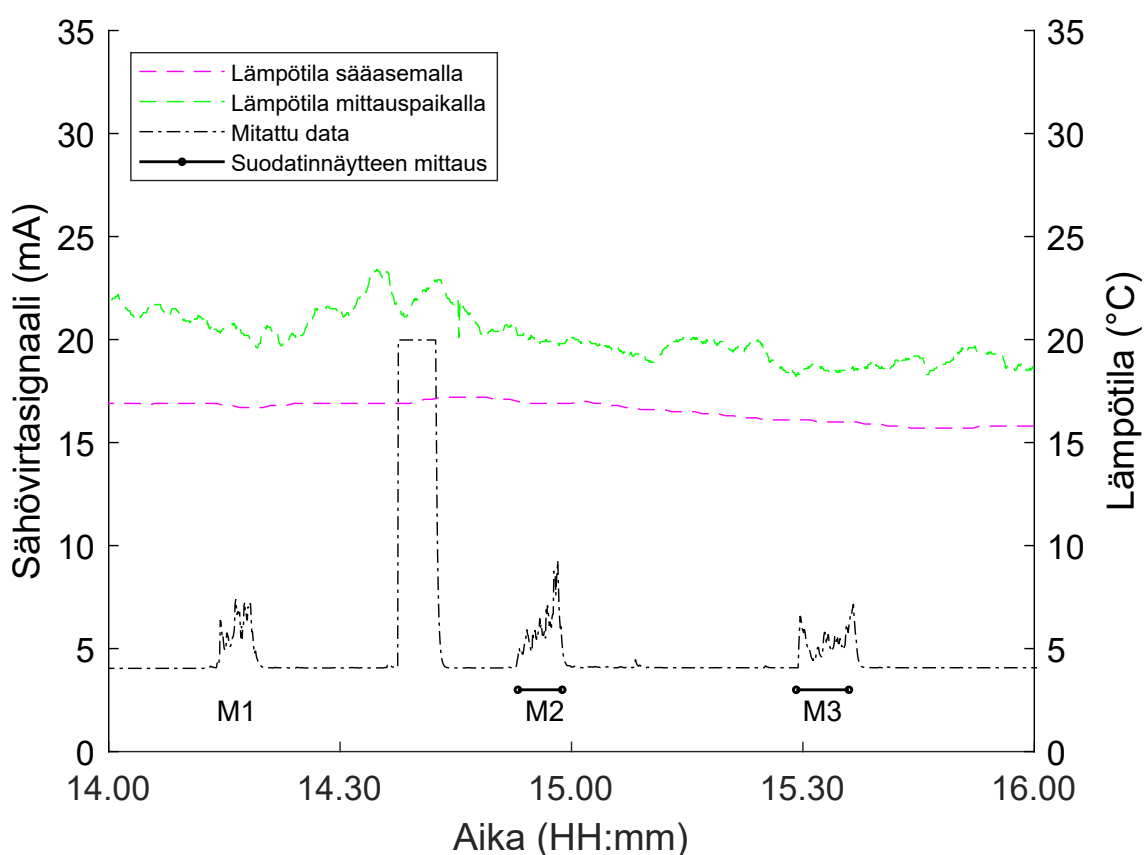
Mittausnumero	7.	8.	9.
Vesisumu käytössä	Kyllä	Kyllä	Ei
Käyttöpaine (bar)	37	37	-
Jahtausetäisyys (m)	10	10	10
Mitattu virtasignaali	4,5	4,8	4,7
Mitattu massakonsentraatio (mg/m^3)	4,9	15,3	7,7
Tuulennopeus (m/s)	7,4	6,1	6,0
Tuulen suunta suhteessa keruuvaunun suuntaan (°)	49	35	76
Lämpötila (°C)	14,4	15,5	16,1
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	19	20	22
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	Ei mittausta	2,4	Ei mittausta
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	0	60	0
Ilmakehän stabiilius	D	D	D
Mittausnumero	10.	11.	12.
Vesisumu käytössä	Ei	Käyttöön kesken mittauksen	Käyttöön kesken mittauksen
Käyttöpaine (bar)	-	37	37
Jahtausetäisyys (m)	10	10	10
Mitattu virtasignaali	4,7	4,3	4,2
Mitattu massakonsentraatio (mg/m^3)	13,1	Ei mittausta	Ei mittausta
Tuulennopeus (m/s)	5,3	7,7	Ei mittausta
Tuulen suunta suhteessa keruuvaunun suuntaan (°)	51	53	Ei mittausta
Lämpötila (°C)	17,3	17,2	14,3
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	22	26	37
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	1,3	1,7	Ei mittausta
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	50	0	22
Ilmakehän stabiilius	D	D	D

Taulukko A.4. Päivän 22.8.2018 mittausten keskiarvoistettu data. Tuulen suunta suhteessa keruvaunuun suuntaan tarkoittaa tuulen nopeusvektorin ja vaunun takaosan väliin rajoittuvaa segmentin kulmaa. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa suoraan kohti vaunun etenemissuuntaa, tuulen suunta suhteessa keruvaunun etenemissuuntaan on 0 °. Jahtausetäisyydellä tarkoitetaan Mittauslaitteiston keskimääräistä etäisyyttä keruvaunusta mittauksen aikana. Lämpötila on keskiarvo mittauspaikalla mitatusta lämpötilasta mittauksessa.

Mittausnumero	13.	14.	15.
Vesisumu käytössä	Ei	Kyllä	Kyllä
Käyttöpaine (bar)	-	37	37
Jahtausetäisyys (m)	13	13	13
Mitattu virtasignaali (mA)	4,7	4,3	4,5
Mitattu massakonsentraatio (mg/m ³)	33,4	9,8	16,5
Tuulennopeus (m/s)	1,7	2,2	3,6
Tuulen suunta suhteessa keruvaunun suuntaan (°)	45	82	46
Lämpötila (°C)	15,8	15,6	17,7
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	20	17	28
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	Ei mittausta	Ei mittausta	1,2
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	0	0	0
Ilmakehän stabiilius	B	B	B
Mittausnumero	16.	17.	18.
Vesisumu käytössä	Ei	Käyttöön kesken mittauksen	Pois käytöstä kesken mittauksen
Käyttöpaine (bar)	-	75	75
Jahtausetäisyys (m)	13	13	13
Mitattu virtasignaali (mA)	5,1	6,5	5,0
Mitattu massakonsentraatio (mg/m ³)	28,5	191,6	54,7
Tuulennopeus (m/s)	4,0	4,6	5,3
Tuulen suunta suhteessa keruvaunun suuntaan (°)	79	79	82
Lämpötila (°C)	19,2	20,7	20,5
Kerätyn turpeen kosteusprosentti (%)	28	25	29
Kerätyn turpeen tuhkapitoisuus (%)	Ei mittausta	Ei mittausta	Ei mittausta
Keruusäiliön täyttöaste mittauksen alussa (%)	0	0	0
Ilmakehän stabiilius	B	B	B

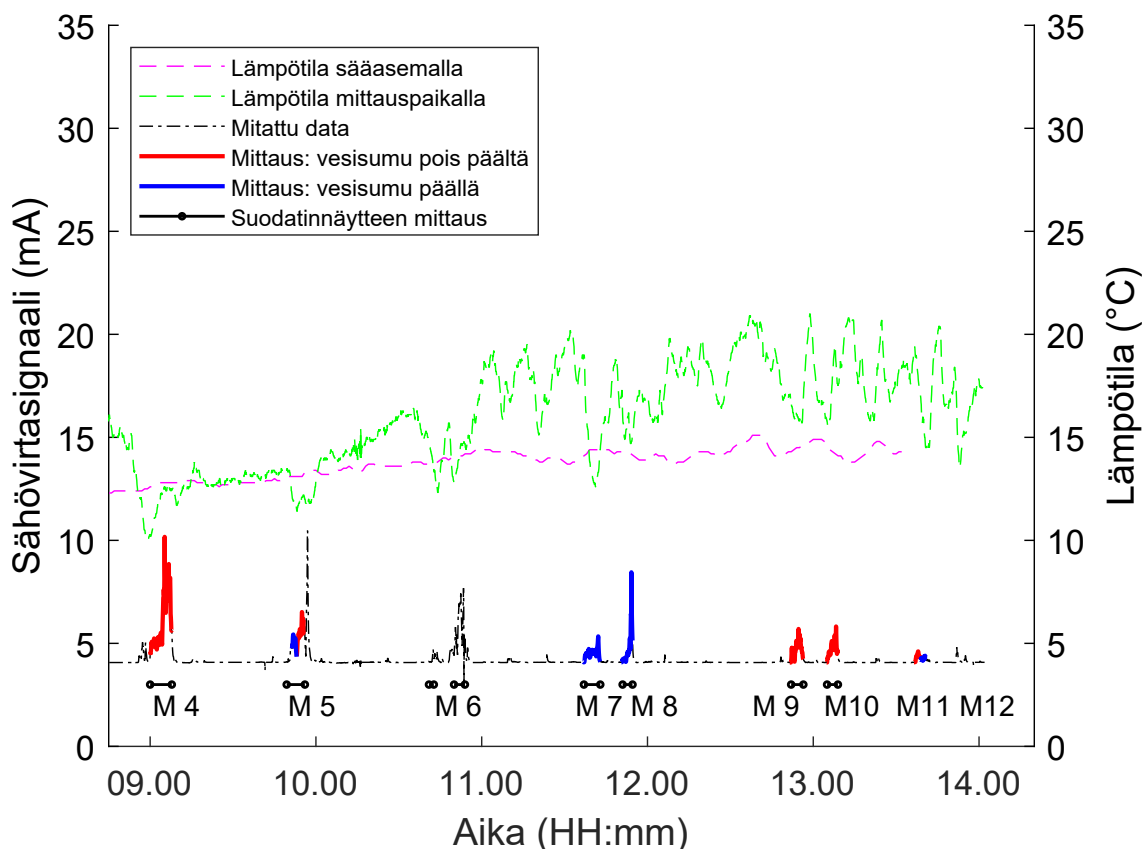
A.2 Mittausdata

Tässä kappaleessa esitellään mittausdata, joka mitattiin kaikkien kolmen mittauspäivän aikana 20-22.8.2018 Sompanevan turvetuotantoalueen Hanhinevalla. Kuviin on koostettu mittauskohtainen SICK FW101 hiukkasmittarilla mitattu pölyämistä kuvaava sähkövirta-signaalidata sekä mittauspaikan lämpötiladata sekä sääaseman mittaama lämpötiladata ja suodatinnäytteiden mittausajat. Kuvasta A.1 löytyy mittauspäivän 20.8.2018 mittausdata mittauskohtaisesti eriteltynä ja taulukkoon A.1 on koottu vastaavalta mittauspäivältä kerätyt keskeiset mittauksia kuvaavat keskiarvoistetut parametrit ja tulokset. Kuvasta A.2 ja taulukosta A.2 sekä kuvasta A.3 ja taulukosta A.4 löytyvät vastaavat esitykset mittauspäiville 21-22.8.2018.



Kuva A.1. Ensimmäisenä mittauspäivänä 20.8.2018 mitattu data. Koska ensimmäisen päivän mittausdataa ei käytetty tulosten laskennassa, mitattu data on merkitty mustalla katkoviivalla. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkösignaali-piikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M1 tarkoittaa mittausta 1.

Kuvissa mustalla katkoviivalla merkittyä mitattua dataa ei ole otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Punaisella viivalla merkitty data tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli käytössä ja sinisellä viivalla merkitty data vastaavasti tarkoittaa mittausta tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli käytössä. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkövirtasignaali-piikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M4 tarkoit-



Kuva A.2. Toisena mittauspäivänä 21.8.2018 mitattu data. Mustalla katkoviivalla merkittyä mitattua dataa ei ole otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Punaisella merkitty data tarkoittaa mittauksista tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli pois käytöstä ja sinisellä merkitty data vastaavasti tarkoittaa mittauksista tai mittauksen osaa, jossa vesisumu oli käytössä. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkövirtapiikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M4 tarkoittaa mittauksista 4.

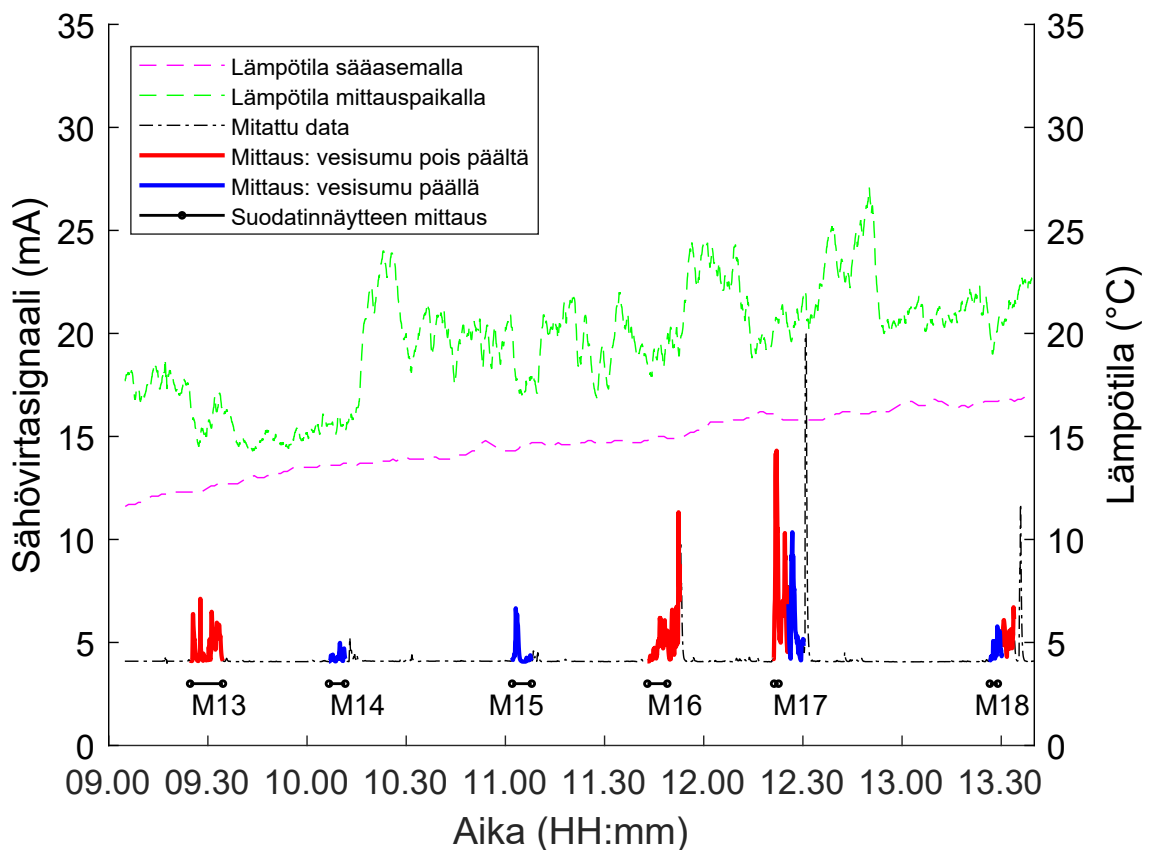
taa mittauksista 4.

Vertailuarvoksi mittausalueella mitatulle lämpötiladatalle kuviin on lisätty myös lähialueella säädataa mitanneen langattoman sääaseman Davis Vantage pro 2:n mitaama lämpötiladata. Sääasema sijaitsee mittauspaikkaan nähden pohjoisempana tuotantoalueen metsäautotien reunassa avoimella alueella. Sääaseman tarkka sijainti suhteessa mittauspaikkoihin löytyy alikappaleen 4.4.4 kuvasta 4.3.

Sääaseman mitaamat lämpötilat ovat joka päivä suurimman osan ajasta muutaman asteen alhaisempia kuin mittauspaikalla mitatut lämpötilat. Sääaseman mitaamat lämpötilat ovat myös paremmin linjassa samaan aikaan mitatun Ilmatieteenlaitoksen Karvia-Alkkia sääaseman lämpötiladatan kanssa. Karvia-Alkkian sääasema sijaitsee muutaman kymmenen kilometrin päässä Sompanevan turvetuotantoalueesta. Mittauspaikalla lämpötila-anturilla mitattu lämpötiladatan keskiarvo muuttuu kuitenkin melko systemaattisesti sääaseman lämpötilan mukaan. Lämpötila-anturi saattoi mitata mittauspäivinä virheellisesti hieman liian suuria lämpötiloja. Voi myös olla, että kentällä tehtyjen mittauksien aikana lämpöä nousi enemmän tummasta turvekentästä kuin langattoman sääaseman

alla olevasta materiaalista. Myös kyydissä ollut generaattori saattoi kasvattaa ympäröivän ilman lämpötilaa. Tätä väittämää vahvistaa se, että mittauspaikan lämpötila-anturin lämpötila nousi aina mittauksen välissä, jolloin mönkijä ei ollut jatkuvasti ajokäytössä.

Mittauksessa mitattu lämpötila laski lähes aina, kun mittaus alkoi ja kasvoi kun mittaus loppui. Tämän aiheutti vesisumumittauksissa veden ilmaa viilentävä vaikutus. Toisaalta myös turvepöly saattaa levitessään lisätä ilman vesihöyrypitoisuutta, mutta tälle väittämälle ei mittausdatasta löydetty vankkoja perusteita. Mikäli generaattori lämmitti merkittävästi ympäröivää ilmaa, myös muuttuva ilmavirta mittauksen aikana alensi mitatun ilman lämpötilaa.



Kuva A.3. Kolmantena mittauspäivänä 22.8.2018 mitattu data. Mustalla viivalla merkittyä mitattua dataa ei ole otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Punaisella merkitty data tarkoittaa mittauksia tai mittauksen osia, joissa vesisumu oli pois käytöstä ja sinisellä merkitty data vastaavasti tarkoittaa mittauksia tai mittauksen osia, joissa vesisumu oli käytössä. Suodatinnäytteen mittaus tarkoittaa aikaväliä, jolla suodatinnäyte mitattiin. Alimpana kuvasta löytyvillä lyhenteillä merkitään yllä olevan mittausdatan sähkövirtapiikki tietyksi mittaukseksi. Esimerkiksi M13 tarkoittaa mittauksia 13.

B ILMATIETEENLAITOKSEN AEROSOLIMITTALAITTEIDEN VERTAILU

Tässä luvussa esitellään Ilmatieteenlaitoksen tekemä testi ulkoilman aerosolien mittauslaitteille.

B.1 Laitevertailun taustaa

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2008/50/EY) ilman laadusta ja sen parantamisesta ilmoittaa muun muassa raja-arvot tiettyjen epäpuhtauksien suurimmille sallituille pitoisuuksille ulkoilmassa. Direktiivin yksi tavoite on estää, ehkäistä tai vähentää epäpuhtauksien haitallisia terveys- ja ympäristövaikutuksia. Raja-arvojen lisäksi direktiivi määrittää havaintoaineiston laatutavoitteet ja epäpuhtauksien mittaamiseen käytettävät referenssimenetelmät. Euroopan yhteisön jäsenmaa voi tehdä mittaukset myös muulla menetelmällä kuin referenssimenetelmällä, jos menetelmän voidaan osoittaa olevan yhdenmukainen referenssimenetelmän kanssa. [70]

Ilmatieteenlaitoksen tutkimuksessa selvitettiin eri aerosolimittalaitteiden sopivuutta PM_{2.5} ja PM₁₀ hiukkasten mittaamiseen Euroopan komission laatiman ohjeen ”Guide for Demonstration of Equivalence of Ambient Air Monitoring Methods” pohjalta. Mittausolosuhteet ja -järjestelyt eivät kaikilta osin vastanneet tätä ohjetta, mutta tutkimus antaa silti tarkkaa tietoa eri laitteiden mittaustarkkuudesta ja soveltuvuudesta ulkoilmamittauksiin eri hiukkaskokoluokissa. Turvenevoilta mitattavat hetkelliset hiukkaspitoisuudet ovat huomattavasti korkeammat kuin normaalit ulkoilman hiukkaspitoisuudet. Tämän vuoksi tässä kappaleessa tarkastellaan vain tutkimuksen niitä mittalaitteita, joilla pystyi mittaamaan vähintään pitoisuuksia $6000\mu\text{g}/\text{m}^3$ tai suurempia pitoisuuksia.

B.2 Mittaukset ja referenssimittalaite

Mittausasema sijoitettiin Helsinkiin Ilmatieteenlaitoksen päärakennuksen läheisyyteen. Mittauspisteen läheisyydessä liikkui noin 50 000 autoa/päivä, joten suurin osa ilman pienhiukkasista tuli liikenteestä. Mittalaitteiden näytteenotot sijaitsivat 3,5 – 4,2 m korkeudella maanpinnasta.[70]

Mittauksien referenssimittalaitteena käytettiin manuaalista laitteistoa. Se rakentui Dikitelin

PM2.5 ja PM10 erottimista ja saksalaisesta MCZ Umwelttechnikin valmistamasta näyte virtausta kontrolloivasta yksiköstä Micro PNS S7, joka kontrolloi mittausjakson virtausnopeutta ja kokonaisvirtaa. Suodattimina käytettiin Millipore Fluoropore FSLW047 polytetrafluorieteeni suodattimia.[70]

Kandidaattimittalaitteet, eli mittalaitteet, joiden soveltuvuutta tutkimuksessa testattiin, on esitelty taulukossa B.1. Jokaista mittalaitetta oli mittauksissa kaksi kappaletta ja niiden näytteenotot oli asennettu vähintään 0,5 metrin etäisyydelle toisistaan. Jokaisen kandidaattimittalaitteen mittaustulosta verrattiin niin referenssimittalaitteen tulokseen kuin toisen vastaavan mittalaitteen tulokseen. Ilmankosteuden alentamiseksi mittauslaitteiden näyteputkea lämmitettiin 35 – 50 °C lämpötilaan [70].

PM2.5-mittaukset tehtiin vuonna 2008 talvella 9 – 13.2 ja keväällä 14.2. – 15.3. Tämän jälkeen PM10 pitoisuudet mitattiin kesällä 9.6. – 11.8 ja syksyllä 12.8. – 12.10. Data tallennettiin pääosin minuutin välein 15 sekunnin keskiarvoista. Tästä poiketen näytteenkeruu aika MP101:lla oli 24 tuntia. [70]

Mittalaitteiden mittaustekniikka perustui joko sidotun elementin oskilloiva mikrobalaansiteknikkaan, β -vaimenemiseen, valon sirontaan tai β -vaimenemisen ja valon sironnan kombinaatioon. Mikrobalaansiteknikassa osa sisään tulleesta virtauksesta erotetaan analysoitavaksi. Erotetun virtauksen hiukkaset kulkeutuvat sidotun elementin suodattimelle. Kohdatessaan suodattimen, ne muuttavat sidotun elementin värähtelytaajuutta. Taajuuden muutos havaitaan taajuuslaskurilla. Tarkemmin laitteen toimintaa havainnollistetaan esimerkiksi Queenslandin ministeriön kotisivulla [48]. β -vaimenemisessa laitteen radioaktiivinen lähde lähettää matalaenergista β -säteilyä. β -säteilyn elektronit törmäävät näytteen hiukkasiin, jolloin β -säteilyn vaimeneminen on verrannollista ohi virtaavien hiukkasten lukumäärään ja kokoon [70].

Taulukko B.1. Taulukkoon on kerätty aerosolimittalaitteiden tiedot ilmatieteenlaitoksen tekemästä ulkoilmamittauksesta [70].

Mittalaite	Mittaustekniikka	Mitattava maksimikonsentraatio $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Environnement MP-101	β -vaimeneminen	10 000
SHARP malli 5030	β -vaimeneminen ja valon sironta	10 000
TEOM 1400ab	Sidotun elementin oskilloiva mikrobalaansiteknikka	$5 \cdot 10^6$
Osiris	Valon sironta	6 000

B.3 Datan käsittely ja tulokset

Sekä referenssimenetelmän että kandidaattimenetelmien mittaustuloksille laskettiin 24 tunnin keskiarvo. Kandidaattimenetelmien mittaustuloksia verrattiin referenssimenetelmän mittaustuloksiin. Tunnuslukuina mittausdatan vastaavuuden vertailussa toimivat datan keruutehokkuus ja suhteellinen laajennettu mittausepävarmuus.[70]

Datan keräystehokkuudella tarkoitetaan mitatun datamäärän ja mitattavissa olleen datamäärän suhdetta. PM10- ja PM2.5-hiukkasmittauksissa datan keräystehokkuus tuli olla 90 %:a tai enemmän. Suhteellinen laajennettu mittausepävarmuus kandidaattimittalaitteelle saadaan vertailemalla sen datapisteitä referenssimenetelmän datapisteisiin. Mitä tarkemmin datapisteiden paikat vastasivat tosiaan referenssi- ja kandidaattimenetelmässä, sitä pienempi kandidaattimenetelmän epätarkkuus oli. Jotta laite läpäisi Euroopan komission mittalaitelaatuvaatimukset, kokonaisepätarkkuus sai olla korkeintaan 12,5 Jos datapisteet ylittivät 12,5 % epävarmuuden, niitä korjattiin laitteelle ominaisella kalibraatioyhtälöllä. Mikäli kalibroinnin jälkeenkään epävarmuuskriteeri ei täytynyt, laite ei läpäisyt testiä.[70]

Oheiseen taulukkoon B.2 on kerätty eri kandidaattimittalaitteiden tulokset. Datan keräystehokkuus oli kaikilla laitteilla yli vaaditun raja-arvon. Myös kaikki laitteet saavuttivat vaaditun suhteellisen laajennetun mittausepävarmuuden, paitsi Osiris hylättiin PM2.5 hiukkasten osalta epävarmuuden ollessa 52,6 %.

Osirixen huonosta suorituskyvystä PM2.5 hiukkasten mittaamisen suhteen löytyy viitteitä myös Ilmatieteen ilmanlaadun mittausohjeesta [30], jossa Osirixen mittausepävarmuus on jopa 124,2 %:a PM2.5 hiukkasille. Kyseisessä raportissa on myös tietoja muiden mittalaitteiden mittaustarkkuudesta. Laittevalmistajat ovat mittausohjeessa suunnilleen samat, kuin tässä tutkimuksessa, vaikka laitteiden mallit eroavat hieman. Osirixesta poiketen, muut mittalaitteet mittaavat PM2.5 hiukkasia melko tarkasti. Mittausohjeessa Osiris kuitenkin toimii hyvin suurilla pitoisuuksilla $< 325 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 hiukkasille mittaustarkkuuden ollessa 15,7 %. Tämä arvo on suunnilleen sama tai hieman parempi kuin muilla laitevalmistajilla. [30]

Mittausten tarkimmat PM10-mittaustulokset kandidaattimenetelmistä mittasi SHARP, malli 5030 kuten taulukosta B.2 näkyy. SHARP oli myös ainoa mittalaite, joka ei tarvinnut kalibraatioyhtälöä päästäkseen vaadittuun mittaustarkkuuteen PM10-mittauksissa. Myös PM10 mittausten datan keräystehokkuus oli korkea ollen molemmilla mittalaitteilla 100 %.[70]

Taulukko B.2. Taulukkoon on kerätty ilmatieteenlaitoksen tekemästä ulkoilmamittauksesta [70] mittalaitteiden suorituskky sekä PM10 että PM2.5 hiukkasille. Sarakkeessa "Datan keruutehokkuus" on kaksi lukuarvoa kummassakin hiukkaskokoluokassa, koska mittalaitteita oli kaksi.

Mittalaite	Suhteellinen laajennettu mittausepävarmuus (%)		Dataparien määrä (kpl)		Datan keruutehokkuus (%)	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Environnement MP-101	1,7	2,9	16	46	96,7 ja 97,8	97,8 ja 98,9
SHARP malli 5030	0,7	5,3	19	47	88,0 ja 98,9	100 ja 100
TEOM 1400ab	11,4	5,1	19	47	88,0 ja 97,8	97,8 ja 98,9
Osiris	52,6	4,0	19	47	98,9 ja 87,0	98,9 ja 98,9